

新型落锤冲击试验系统研制

江磊^{1,2}, 吴乙万^{1,2}, 白鸿柏^{1,2}, 李上洲^{1,2}, 任志英^{1,2}

(1. 福州大学 金属橡胶工程研究中心, 福州 350108;

2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: 针对现有落锤冲击试验系统无法低成本、高精度地获取冲击全过程中试样的力、位移等参数的技术难题, 提出一种新型落锤冲击试验系统; 该试验系统采用磁栅尺和动态力传感器直接精确测量被测试件的力与位移数据, 通过电磁铁与电动绞盘实现锤头的提升与释放, 并利用虚拟仪器 LabVIEW 实现对冲击试验系统的数字化控制和数据采集分析功能; 以 304 不锈钢圆管为测试样件, 通过冲击试验与 ABAQUS 有限元冲击仿真试验进行对比, 结果表明, 冲击实测数据与仿真数据吻合较好, 证实所设计冲击试验台具有较高的可靠性。

关键词: 落锤; 冲击试验; LabVIEW; 磁栅尺位移传感器; 压电式动态力传感器

Development of a New Drop Hammer Test System

Jiang Lei^{1,2}, Wu Yiwan^{1,2}, Bai Hongbai^{1,2}, Li Shangzhou^{1,2}, Ren Zhiying^{1,2}

(1. Engineering Research Center for Metal Rubber, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To obtain the force and displacement parameters of the specimen in the whole process of impact with low cost and high precision, a new drop hammer test system was developed. A magnetic sensor is used to measure the displacement of the hammer. A piezoelectric dynamic force sensor is used to measure the impact force. The hammer is lifted and released by an electromagnet and an electric winch. The control, data acquisition and analysis of the impact test system are realized by NI LabVIEW. To validate the correctness of the new drop hammer test system, a comparison between drop test and simulation for a 304 stainless steel pipe was carried out. The comparison results show that the force-displacement curve drawn in accordance with the measured data matched well with that by simulation, indicating that the accuracy of the drop hammer test system was high.

Keywords: drop hammer; impact test; LabVIEW; magnetic sensor; piezoelectric dynamic force sensor

0 引言

材料的动态力学性能对其抗冲击特性有显著影响, 精确获取冲击全过程中试样的力、位移等数据对新型材料的开发具有重要意义。

目前用于材料冲击力学性能研究的冲击试验系统主要有: Hopkinson 压杆试验系统^[1]、空气炮^[2]、摆锤式冲击试验系统^[3]以及落锤式冲击试验系统^[4]。相对于其他冲击试验系统, 落锤冲击试验台具有成本低、安全可靠等优点。落锤式冲击试验系统的工作原理是将一定质量的重锤提升到某一高度后释放, 通过锤体的自由落体运动将重力势能转换成冲击能量, 或者锤体在预加力机构作用下, 获得一定的初始速度对被测试件进行冲击, 以此验证材料的抗冲击性能^[5]。

常规落锤式冲击试验设备仅用于验证试样(金属/非金

属结构件)承受冲击载荷后的损伤情况, 对冲击过程中试样的冲击载荷、变形状况的时间历程关注较少。现有落锤冲击试验系统主要采用以下两种途径获取冲击过程中的冲击载荷时间历程: 通过冲击过程中锤头加速度变化根据牛顿第二定律计算冲击载荷; 通过由安装在锤头的动态力传感器直接测量冲击载荷。现有落锤冲击试验系统测量试样变形量的时间历程的方法主要有: 借助高速相机拍摄冲击历程, 通过图像处理获得冲击过程中锤头位移、速度和加速度的时间历程^[6-7]; 使用高速激光位移传感器测量冲击点背部的位移和速度^[8]; 通过安装在锤头的加速度传感器进行二次积分获取位移信息^[9]。

虽然现有技术已能实现冲击过程中冲击载荷和位移的时间历程实时测量, 但仍存在以下不足之处: 通过加速度传感器计算冲击载荷为间接测量对传感器的精度要求高; 通过加速度二次积分计算位移存在传感器零飘和电磁干扰而导致精度降低的可能; 通过高速相机和高速激光位移传感器测量位移需要的硬件成本较高昂^[10]。随着科技的进步, 新材料的层出不穷, 且对材料的抗冲击性能研究已经不仅仅满足在测试材料的损伤情况, 为了更进一步研究各种新型材料的抗冲击性能, 传统的落锤冲击试验台因存在操作不便, 安全可靠程度不高的缺点, 且如上文所述, 其

收稿日期: 2019-07-09; 修回日期: 2019-08-01。

作者简介: 江磊(1994-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事振动控制与减振材料方向的研究。

通讯作者: 吴乙万(1984-), 男, 福建厦门人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事振动与冲击防护、金属橡胶材料制备/表征/工程应用方向的研究。

无法精确获取被测材料在冲击过程中的动态参数, 在此背景下, 本文将设计一种低成本新型落锤冲击试验系统, 采用动态力传感器和磁栅尺位移传感器实现冲击过程中冲击载荷与位移的精确测量, 利用 LabVIEW-RT 实现冲击试验系统实时控制与数据采集。

1 落锤冲击试验系统总体方案

图 1 为落锤式冲击试验系统的方案示意图。实时机从宿主机获取实时代码, 通过 PCIe-6353 多功能数据采集卡输出控制信号, 经放大电路调制后控制执行器(电动绞盘、电磁铁)工作, 进而使锤体提升或释放, 在冲击过程中三种传感器实时采集锤体动态信号, 并由 PCIe-6353 完成实时数据采集, 然后实时机将数据通过 TCP/IP 回传至宿主机进行数据存储与显示。落锤式冲击试验系统主要包含: 软件部分、硬件部分、实时平台和信号处理系统。试验系统各部分的功能如表 1 所示。

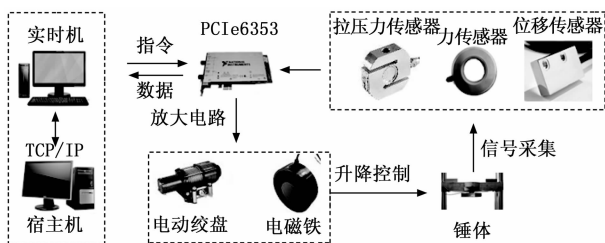


图 1 落锤式冲击试验系统方案示意图

表 1 落锤式冲击试验系统各部分功能表

组成		功能	
软件部分	GUI 界面	虚拟控制面板与数据可视化	
	控制算法	实现电动绞盘、电磁铁启停控制	
硬件部分	传感器	拉压力传感器	测量加力机构额外施加的载荷
		动态力传感器	测量反作用于锤头的冲击载荷
		磁栅尺	测量锤头的位移
	执行机构	电磁铁	实现锤头的吸和与脱离
		电动绞盘	实现锤头的提升
机械结构	机架	总体安装框架并实现落锤锤头导向	
	锤头	用于施加冲击载荷	
	加速机构	使锤头获得一定的初始速度	
实时平台	主机	控制代码编写、下载实时代码	
	目标机	运行控制算法	
信号处理系统	驱动电路	驱动电动绞盘、电磁铁	
	多功能数据采集卡 (PCIe-6353)	采集传感器信号、输出控制信号	

2 落锤式冲击试验系统设计

2.1 实时平台

落锤式冲击试验系统的实时平台由两台计算机组成(宿主机和实时目标机)。宿主机与实时目标机采用 TCP/IP 通讯方式进行数据交互。操作人员可在宿主机上利用图形化编程语言 LabVIEW 编写人机交互界面、电动绞盘与电磁铁控制程序、传感器数据采集程序, 且可将程序编成实

时代码并下载至实时目标机。实时目标机作为实时运算平台, 运行控制程序并利用 PCIe-6353 多功能数据采集卡完成传感器信号采集与驱动信号输出工作, 连接到采样频率为 20 kHz 的数据采集系统, 因此采集卡完成传感器信号采集与驱动信号输出工作。

2.2 硬件部分

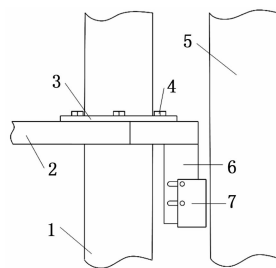
2.2.1 机械结构

2.2.1.1 机架

机架作为落锤冲击试验系统的安装载体, 应具有足够的刚度与强度以保证在冲击过程中不会发生变形, 其关乎整个落锤试验系统的稳定可靠性。采用 T 型槽铸铁平台作为安装底座, 其加工有若干螺纹孔用于安装支撑柱、导向柱和电动绞盘等。选用四根长 4 m、直径 100 mm 的镀铬光轴作为支撑柱, 选用为两根长 4 m 直径为 60 mm 的镀铬光轴作为锤头导向柱, 选用一根长 4 m 的 6060 工业铝型材作为磁条的安装轨道。采用一块的铁板作为顶板, 其上加工有若干螺纹孔用于安装支撑柱、加力弹簧、定滑轮等。

2.2.1.2 锤头

锤头是在冲击试验中与试件直接接触的部件, 需保证其有足够的刚度以免在冲击过程中发生变形。设计的锤头如图 2 所示。整体采用 45 钢加工而成, 其总质量为 76 kg。锤头的两端开有通孔并内嵌自润滑石墨青铜套, 锤头的石墨青铜套与导向柱之间为间隙配合。自润滑石墨青铜套能大大降低锤体和导向杆之间在落锤过程中产生的摩擦力, 避免因过多的摩擦导致冲击初始速度实际值与理论值偏差较大; 同时, 亦减少对导向柱表面的磨损, 延长落锤冲击试验系统使用寿命。锤头一端加工有磁栅尺位移传感器的读磁头安装座, 用于安装读磁头以实现冲击过程中锤头位移的精确测量, 其具体安装方式如图 2 所示。



1. 导向柱; 2. 锤体; 3. 石墨青铜套; 4. 锁紧螺母; 5. 铝型材; 6. 磁栅尺固定座; 7. 磁栅尺。

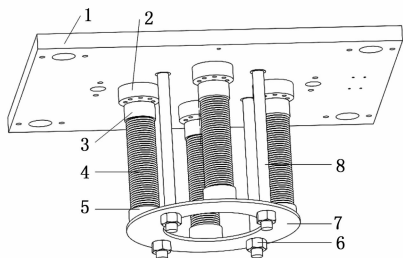
图 2 锤头及磁栅尺结构示意图

2.2.1.3 加速机构

由落锤冲击试验系统原理可知, 冲击能量仅靠锤头自由落体所产生, 其受锤头重量和导向柱长度约束, 为增大冲击能量设计如图 3 所示的加速机构。该机构主要由四根线性弹簧和导向杆组成。弹簧压缩后, 在锤头释放瞬间加速机构储存的弹性势能将转变为锤头的动能。由于弹簧压缩储能能量 ΔE 为:

$$\Delta E = \frac{1}{2}k\left(\frac{\Delta F}{k}\right)^2 \quad (1)$$

式中, k 为加力弹簧刚度值; ΔF 为额外施加的弹簧力。



1. 承重板; 2. 轮辐式拉压力传感器; 3. 上弹簧座; 4. 线性弹簧; 5. 下弹簧座; 6. 锁紧螺母; 7. 加力板; 8. 导向杆。

图 3 加速模块结构图

选用刚度为 60 kN/mm 四根线性弹簧, 线性弹簧自由状态下高度为 100 mm, 最大压缩量程为 50 mm, 四根弹簧能提供最大值为 12000 kN 的预加力。

2.2.2 传感器

为便于控制落锤冲击试验装置的初始冲击速度, 加速模块中四根线性弹簧上方安装有 4 个轮辐式拉压力传感器, 用于测量加速机构额外施加的弹簧力。选用杭州美控自动化技术有限公司生产的 MIK-LCLY 轮辐式拉压力传感器, 单个量程为 5000 kN, 精度为 0.3%FSR。

动态力传感器选用扬州一轩公司生产的 YX-60T 动态力传感器, 其安装在锤头的下表面中心部位, 用于测量冲击过程中作用于锤头的冲击反作用力。该传感器量程为 60 T, 分辨率为 1.95 Pc/N。另外, 可根据测量冲击力的大小更换不同量程的动态力传感器。

磁栅尺位移传感器的输出为数字脉冲信号, 具有优异的抗干扰性能。将磁条贴于平行导向柱的轨道上, 并将读磁头安装在锤头的一侧。锤头运动过程中读磁头将与磁条有相对位移, 并输出脉冲信号。读磁头选用意大利 GIVI 公司生产的 MTS-H100C 读磁头。该读磁头的位移分辨率为 25 μ m, 可承受 100 g、11 ms 的冲击, 能满足落锤式冲击试验系统的使用需求。

2.2.3 执行机构

2.2.3.1 电磁铁

针对系统功能要求和实现成本, 采用电磁铁实现锤头的抓取与释放, 其最大吸力应满足下式:

$$F_{e_max} \geq M_h g + F_{s_max} \quad (2)$$

式中, F_{e_max} 为电磁铁的最大吸力; M_h 为锤头重量; F_{s_max} 为加力机构所能产生的最大弹簧力。

电磁铁选用乐清兴昊电气有限公司生产的 XDA-240/80, 最大吸力为 2000 kg。

2.2.3.2 电动绞盘

电动绞盘用于实现锤头的提升, 要求其提升力足且提升速度缓慢。将电动绞盘安装在 T 型槽铸铁平台上, 其绞盘里钢丝绳的另一端通过定滑轮组与电磁铁起吊耳相连,

通过控制绞盘通断电实现锤头的提升与停止。选用沈阳木禾起重设备有限公司生产的 24 V 电动绞盘, 其最大垂直吊重 20000 kN, 提升速度为 3 m/min, 能满足冲击试验系统的功能需求。

2.3 信号处理系统

落锤冲击试验系统的信号处理由一块 NI DAQ 板卡完成, 该板卡可以和 LabVIEW 编程环境完美契合, 能够采集传感器信号和生成多种控制信号。由于冲击过程历时较短通常为毫秒级, 因此要求板卡的采样速率足够高。选用美国国家仪器公司生产的 PCIe 6353 多功能数据采集卡。该采集卡最大采样速率可达 1.25 MS/s, 拥有多路 IO 数字输入输出端口可实现对电磁铁与电动绞盘的精确控制, 拥有 32 位计数/定时器可用于磁栅尺编码信号的精确采集, 并拥有多路 16 位模拟通道可实现动态力传感器和拉压力传感器的精确采集。该多功能数据采集卡安装与实时目标机的 PCIe 插槽, 可实现实时采集与控制输出。

多功能数据采集卡的输出端口驱动能力有限, 无法直接驱动电磁铁和电动绞盘。为实现锤头的抓取、释放、提升等动作, 设计如图 4 所示功率放大电路。

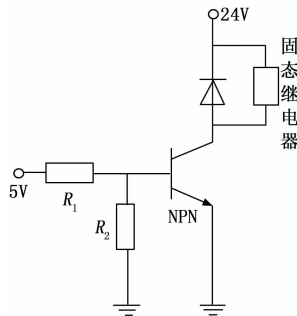


图 4 功率放大电路

在本落锤冲击试验系统中, 选用的动态力传感器为压电式传感器, 它安装在冲击试验系统的锤头正下方, 用来测量锤体在冲击过程中所受的载荷大小, 由于所以选用的 PCIe-6353 多功能数据采集卡无法识别电荷信号, 故动态力传感器采集的电荷信号经放大器转换后传输到数据采集卡上, 数据采集卡将传感器经放大后的电压号转换成数字信号传输至实时平台保存, 方便后期进一步对试验数据进行处理分析。

2.4 软件部分

LabVIEW 作为美国国家仪器公司 (NI) 公司开发的一种编程语言, 其使用图形化的语言, 界面操作简单直观, 交互界面友好^[11], 在工业控制和测试测量等方面广泛应用, 落锤式冲击试验系统的软件部分设计采用 LabVIEW 编程语言作为开发具, 其主要包括: 实时采集与控制程序和图形化人机交互界面。

在落锤式冲击试验系统中, 实时数据采集与控制算法均在后台运行, 为便于试验操作和数据处理, 利用 LabVIEW 设计落锤冲击试验系统的 GUI 界面, 如图 5 所示。

该落锤冲击试验系统 GUI 界面的功能主要包括: 系统配置区、锤头状态控制 (抓取、释放、提升) 区、试验数据实时显示区等。



图 5 落锤冲击试验台测控系统界面

测控系统工作流程示意图如图 6 所示, 系统测控软件主要参考 JJG541—2005 《落体式冲击试验台检定规程》现行冲击实验设备检定规程中的相关要求, 对系统测控软件进行总体设计, 测控系统工作流程示意图如图 6 所示。

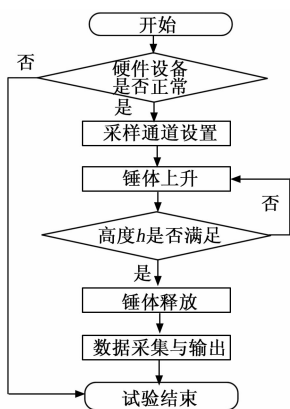


图 6 测控系统流程图

3 落锤冲击试验系统性能试验

搭建完的落锤冲击试验系统如图 7 所示。

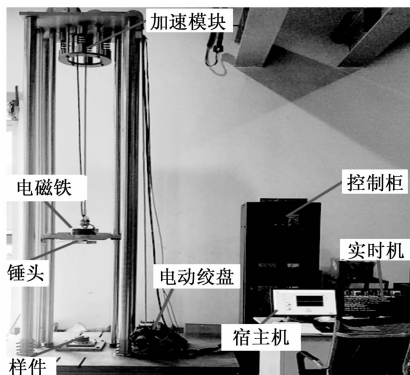


图 7 落锤冲击试验台

为测试所设计的冲击试验系统的是否具有稳定的工作性能, 以 304 不锈钢圆管作为测试样件进行落锤冲击试验, 测试样件如图 (8) 所示。

304 不锈钢圆管的参数如表 2 所示。

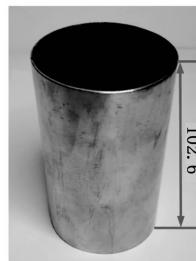
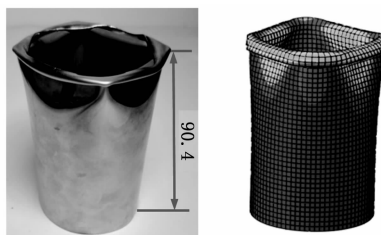


图 8 圆管试件

表 2 圆管参数

名称	数值
圆管材料	304 不锈钢
总高度	102 mm
直径	63mm
厚度	1.5 mm

将试验试件固定安装后, 将锤体提升到 460 mm 高度, 试件在冲击作用下的最终变形图如图 9 (a) 所示, 经实际测量后其变形量为 12.2 mm。为进一步验证冲击试验系统可靠性, 通过仿真软件 ABAQUS 模拟冲击试验, 在相同的试验参数下得到的圆管的仿真模拟变形图如图 9 (b) 所示。由对比图 9 (a)、(b) 可知, 仿真与实验后不锈钢管的变形情况基本一致。



(a) 冲击试验变形图 (b) 有限元模拟变形图

图 9 冲击试验与有限元模拟的变形对比图

实际冲击试验与仿真试验各项参数如表 3 所示, 冲击过程的力—位移曲线对比如图 10 所示。由两种试验力—位移曲线对比可知, 空心圆管冲击试验与有限元仿真试验的冲击过程中力与位移曲线变化趋势基本一致。由表 3 中实际冲击试验与仿真冲击试验数据对比表明所设计的试验系统具有较高的可靠性。

表 3 实际冲击试验与仿真冲击试验数据对比表

类型	试验参数	最大冲击力	最大变形值
		/kN	/mm
冲击试验		32.6	12.2
仿真试验		33.7	13.8
误差/%		3.3	13

4 结论

本文通过对已有的落锤冲击试验台的结构和主要功能研究分析, 并针对上述不足之处, 通过利用动态力传感器

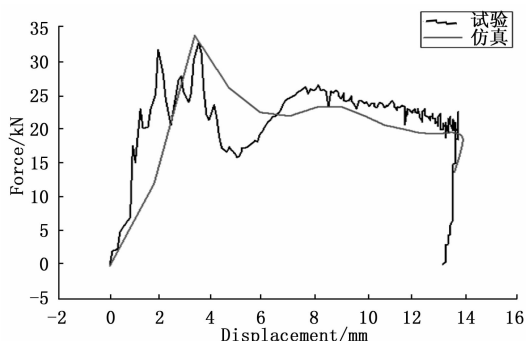


图 10 冲击试验与有限元仿真力一位移曲线对比图

和磁栅尺位移传感器研制了一种低成本、操作简单和可精确采集被测试件在受冲击过程中的动态参数的落锤冲击试验台，最大初始冲击速度能达到 9 m/s，且通过调整锤体对线性弹簧的压缩量获得不同的冲击速率，模拟不同的冲击工况，以便更好对被测试件进行冲击性能研究。待落锤冲击试验系统组装完成后，以 304 不锈钢圆管作为被测试件，通过实际冲击试验与有限元仿真冲击试验进行对比分析，在实际冲击试验过程中冲击试验系统结构稳定性表现良好，各传感器和关键模块工作可靠，满足落锤冲击试验的测试要求，且实际试验结果与仿真试验结果吻合度较高，表明所设计的落锤冲击试验系统具有较高的可靠性。

参考文献:

[1] Nie H, Suo T, Wu B, et al. A versatile split Hopkinson pressure bar using electromagnetic loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 116: 94 - 104.

(上接第 210 页)

由表 2 可见，此 FIR 滤波器仿真可实现 211.73 MHz 的工作频率。eFPGA 功耗为 115.17 mW，面积为 4.8 mm²，面积及功耗较为理想，可以满足 SoC 集成的要求。

5 结束语

本文提出了一种基于 eFPGA 的逻辑重构方案，用于通信基带加速器发生故障时实现功能自愈。通过 JTAG 扫描链重构互连关系，将 eFPGA 接入数据通路，利用 eFPGA 重构故障模块的逻辑，进而代替通信基带加速器执行特定功能实现自愈。使用 eFPGA 编译器进行典型算法仿真，并在 eFPGA 评估板上完成验证，结果显示 eFPGA 有比较理想的面积与功耗，预期的设计功能可以实现。此方案克服了传统自愈方案资源开销大、执行效率低的缺陷，可有效提高系统可靠性与灵活性，为电路自愈技术提供了参考思路。

参考文献:

[1] 陈后金, 薛建, 胡健. 数字信号处理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
 [2] Joseph Boccuzzi. Signal Processing for Wireless Communica-

[2] Zhang S, Wang S P, Zhang A M, et al. Numerical study on motion of the air-gun bubble based on boundary integral method [J]. Ocean Engineering, 2018, 154: 70 - 80.
 [3] Matthew B, Marc - André D, Gordon W. Cold temperature effects on the impact resistance of thin, light weight UHPFRC panels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 127: 110 - 121.
 [4] Reynolds J G, Hsu P C, Hust G A, et al. Hot spot formation in mock materials in impact sensitivity testing by drop hammer [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42: 1303 - 1308.
 [5] 杨明坤, 杨昌棋. 落锤冲击试验系统搭建 [J]. 仪表技术, 2017 (10): 14 - 17.
 [6] 王秀丽, 马肖彤, 梁亚雄, 等. 斜向冲击下单层网壳结构的动力响应试验 [J]. 振动·测试与诊断, 2016, 36 (3): 445 - 450.
 [7] 许斌, 曾翔. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014 (2): 41 - 51.
 [8] 宁宝军, 于哲峰, 叶文勋, 等. 基于非接触位移测量的层压板低速冲击性能分析 [J]. 复合材料学报, 2016, 33 (7): 1564 - 1573.
 [9] 陈宏亮, 马少杰, 张英忠, 等. 三轴高 g 值加速度传感器的测试技术研究 [J]. 传感技术学报, 2018, 31 (2): 175 - 179.
 [10] 任鹏, 张伟, 刘建华. 铝合金格栅夹层结构水下抗冲击特性的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36 (1): 101 - 106.
 [11] 王玉华, 黄凯明. 基于 LabVIEW 的冲击力检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (4): 19 - 22.
 [12] 李德军, 王超, 王超, 等. 基于 LabVIEW 的冲击力检测系统设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
 [13] Cuppini M, Scarselli E F, Mucci C, et al. Soft-core eFPGA for Smart Power applications [A]. System-on-Chip (SoC) 2014 International Symposium [C]. Italy: IEEE, 2014: 1 - 4.
 [14] 梅晨. 面向通信基带信号处理的可重构计算关键技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017: 15 - 30.
 [15] 程锡斌. FPGA 中 JTAG 控制器的设计与仿真 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016: 9 - 23.
 [16] 程小雨. 基于 Xilinx FPGA 的 OFDM 基带通信系统设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2018: 8 - 28.
 [17] Turki M, Marrakchi Z, Ben M S, et al. Embedded FPGA accelerator for Wireless sensor network nodes [J]. Design & Test Symposium (IDT), 2016, 11: 313 - 318.
 [18] 田耘, 徐文波. Xilinx FPGA 开发实用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
 [19] 蔡觉平, 翁静纯, 褚洁, 等. Verilog HDL 数字集成电路高级程序设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2015.
 [10] 张裕. 基于 FPGA 的通用 FFT 处理器的研究与实现 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011: 25 - 52.
 [11] 蒋磊. 基于 FPGA 的 OFDM 水声通信系统设计与实现 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016: 6 - 12.