

中华人民共和国教育部 主管  
上海交通大学 主办

CN 31-1707/T  
ISSN 1006-7167  
CODEN: SYYT AZ

# 实验室研究与探索

Shiyanshi Yanjiu yu Tansuo  
Research and Exploration in Laboratory



中国高等教育学会实验室管理工作分会会刊  
中文核心期刊  
中国科技核心期刊  
RCCSE中国权威学术期刊

## 2022/03

第41卷 第03期  
Vol. 41 No.03

总第313期 (月刊)  
Serial No. 313(Monthly)

实验室研究与探索

Vol.41 No.03 Serial No.313 第41卷 第03期 总第313期

March 2022

ISSN 1006-7167



9 771006 716226



# 实验室研究与探索 (月刊)

SHIYANSHI YANJIU YU TANSUO

第 41 卷第 3 期总第 313 期

1982 年创刊

2022 年 3 月出版

期刊基本参数:CN31-1707/T\*1982\*m\*A4\*322\*zh\*P\*26.00\*7150\*65\*2022-03

## 目 次

### · 实验技术 ·

|                                      |               |    |
|--------------------------------------|---------------|----|
| 多时间尺度下含混合储能的生物质能 CHP 微网滚动优化 .....    | 杨晓辉,张亮,李昭辉,等  | 1  |
| 带摩擦补偿的运动控制探索型实验设计 .....              | 程国扬,刘阳阳       | 8  |
| 基于 YOLOv4 算法的煤矿井下粉尘检测方法 .....        | 程学珍,赵振国,刘兴军,等 | 14 |
| MXene 杂化硅烷膜制备超疏水/抗菌金属表面防护涂层 .....    | 曹美文,聂焱,王栋     | 19 |
| 盐渍土环境下 GFRP 复合桩水平承载性能变化 .....        | 张建伟,丁乐,樊亚龙,等  | 23 |
| 一种提高双向全桥 LLC 谐振变换器反向电压增益的设计及实现 ..... | 叶宗彬,武展飞,邓先明   | 30 |
| 土体微观结构定量分析方法探讨 .....                 | 李佳明,唐世斌,毕鹏雁,等 | 34 |
| BP 神经网络预测架空覆冰导线气动系数 .....            | 刘小会,周顺,汪顺,等   | 42 |
| 核酸适配体荧光分子开关的啮虫肽测定 .....              | 杨丽敏,李明明       | 50 |
| DCO-OFDM 系统中 BPNN 信道估计方法 .....       | 李晓记,高天,阎威龙,等  | 54 |
| 磷含量的图片比色法测定与人工神经网络模拟 .....           | 高光芹,李瑞歌,谢普会,等 | 59 |
| 液压胀合成形复合管弯曲失效行为研究 .....              | 姚兴军,范贤勇       | 63 |
| 如东海上风电场穿堤海缆管线对堤身沉降及渗流的影响 .....       | 侯斯嘉,徐政峰       | 70 |

### · 仪器设备研制与开发 ·

|                                |               |    |
|--------------------------------|---------------|----|
| 直膨式太阳能热泵地板辐射供暖实验平台设计 .....     | 孔祥强,闫循正,张鹏,等  | 75 |
| 一种快速测量薄膜 R-T 曲线的简易装置 .....     | 屈豪杰,郭玉斌,张东徽   | 79 |
| 基于 LoRa 技术的两栖无人机环境监测系统设计 ..... | 王若岩,刘洪玮,王廷煜,等 | 82 |
| 碲@二氧化碲纳米材料温差发电片研制 .....        | 吴小平           | 86 |
| 一种双相感应电动机控制实验装置的设计 .....       | 韩林睿,邓永红       | 90 |
| 多层次特征融合的视频显著目标检测系统设计 .....     | 毕洪波,朱微微,杨丽娜,等 | 94 |

### · 专题研讨——虚拟仿真技术(104) ·

|                                    |               |     |
|------------------------------------|---------------|-----|
| LCL 型三电平并网逆变器的模型预测控制及实验研究 .....    | 张辉,郭涛,王剑,等    | 99  |
| 基于 Pre-Scan 的自动驾驶车辆 AEB 试验设计 ..... | 杨建军,倪兴涛,邹晋彬,等 | 106 |
| 基于数值模拟的炸药爆速测试虚拟仿真 .....            | 袁俊明,夏韬,于雁武,等  | 111 |
| 基于物联网监控的智能驱鸟器设计 .....              | 丁宇浩,李栋,温权龙,等  | 116 |
| 基于离散切比雪夫变换及 LT 编码的水印算法 .....       | 石红芹,孙丹        | 121 |
| 基于 IPSO_CS 的云资源调度算法仿真研究 .....      | 李新飞,谢晓兰       | 127 |
| 准谐振单端逆变器的时域分析和参数设计 .....           | 张德华,傅晓程       | 133 |
| 基于奇异值分解的改进 GRAPPA 算法研究 .....       | 魏小琴,何汶静,李杨,等  | 139 |
| 高性能双通道稀疏采样虚拟示波器研制 .....            | 姜斌,唐禹,包建荣,等   | 144 |

### · 实验教学示范中心建设 ·

|                                  |               |     |
|----------------------------------|---------------|-----|
| 学习空间视域下的近代物理实验室建设探索 .....        | 潘崇佩,赵玮璐,陈靖,等  | 150 |
| 支持 9 种工作模式的 ARM 寄存器堆结构设计方法 ..... | 章复嘉,谢澄扬,高顶冲,等 | 155 |
| 基于 STEP 理念的大学生创新教育与实践 .....      | 梁楠,张晓         | 161 |
| 荧光分析实验的教学拓展与探索 .....             | 贾莉,马锴果,赵浩,等   | 165 |

### · 实验教学与创新 ·

|                                       |               |     |
|---------------------------------------|---------------|-----|
| 管道内壁缺陷电磁成像教学实验系统开发 .....              | 袁新安,张广泰,李伟,等  | 169 |
| 天文自适应光学系统实验教学实验设计 .....               | 彭志欣,陈亮        | 174 |
| 通过有机化学实验教学培养学生新药研发能力 .....            | 陈韶蕊,余旭东       | 177 |
| 新工科背景下计算材料学实验教学改革与实践 .....            | 郭丹,金剑锋,王明涛,等  | 181 |
| 基于 Unity3D 的板球系统仿真实验建设与教学 .....       | 郭铁铮,郑亦峰,陈巍,等  | 187 |
| “三维度虚实结合”的集成电路专业实践教学研究 .....          | 刘慧敏,姜训勇,苏林,等  | 193 |
| 将科研成果“3D 打印黑体锥用于海水淡化”转化为教学实验的实践 ..... | 卢松涛,王群,李杨,等   | 198 |
| 以学习内化驱动的专业实践类课程思政建设实践 .....           | 郭名静,熊鑫,景琳,等   | 202 |
| 运用流式细胞术推进自主研究型免疫学实验改革的探讨 .....        | 窦环,乔晓月,傅娟华,等  | 207 |
| 验证性实验教学改革的实践与探索 .....                 | 方心葵,葛海燕,陈鲁勇   | 212 |
| 再生铬鞣剂的制备与应用综合教学实验设计 .....             | 张金伟,何秀        | 217 |
| 基于问题导向的毒理学基础实验教学模式探讨 .....            | 郭蓉,曾明,关岚,等    | 221 |
| 新冠疫情背景下混合式药理学实验教学模式的探索 .....          | 姜琳琳,曹水娟,丁庭波,等 | 227 |

|                                    |               |     |
|------------------------------------|---------------|-----|
| 分子对接技术在药物化学实验中的教学实践 .....          | 席佳越,张东旭,聂慧芳,等 | 231 |
| 绿色化学指导下的薄层色谱实验教学改革 .....           | 宋丽丽,殷宏庆,曹颖,等  | 235 |
| <b>· 实习与实训 ·</b>                   |               |     |
| 新工科建设背景下校外实践教学的协同育人机制探索与实践 .....   | 王力纲,白秀梅,方岩雄   | 238 |
| 基于课程式双重 DQN 的水下无人飞行器路径规划 .....     | 王莹莹,周佳加,高峰,等  | 244 |
| 问题导向型数控车虚实结合教学实践与探索 .....          | 王建武,金仁东,王超,等  | 249 |
| <b>· 实验室建设与科学管理 ·</b>              |               |     |
| 人工智能开放式实验室建设与管理探索 .....            | 刘洁怡,周佳社,王新怀,等 | 252 |
| 近 10 年来有关高校实验室的研究热点及前沿探析 .....     | 镇丽华           | 256 |
| 基于探究性实验的农业工程专业教学实验室优化配置和管理思考 ..... | 沈明卫,郝飞麟,何勇,等  | 262 |
| 基于概率犹豫模糊语言的航海类高校实验室评价 .....        | 王志平,傅敏,王沛文    | 266 |
| 高校实验室资源管理创新探究 .....                | 冷鑫,贾文涛,李剑利,等  | 273 |
| <b>· 文经管类实验室 ·</b>                 |               |     |
| 应用大数据构建“数”“智”型管理类实验室的探索 .....      | 程珊珊           | 277 |
| <b>· 仪器设备供应与管理 ·</b>               |               |     |
| 基于财务管理视角下的高校采购管理研究与实践 .....        | 王杰,沈莹,高惠      | 281 |
| 新农科背景下大型仪器开放共享平台的建设与实践 .....       | 王刻铭,刘浩源,刘仲华   | 287 |
| 高校大型仪器设备购置经费统筹管理探索 .....           | 黎雪莲,周志云,罗书强,等 | 292 |
| 基于 PDCA 持续改进的高校固定资产账实精细化管理 .....   | 杨梅蓉           | 296 |
| <b>· 实验室环境与安全 ·</b>                |               |     |
| “双创”智能化实验室开放共享的安全策略 .....          | 邱敦国,李发均,廖勇,等  | 300 |
| 基于 VR 全景的实验室安全教育的设计与实践 .....       | 王艺芳,陆嘉宜,王静,等  | 304 |
| 机械专业研究生实验室安全教育现状分析 .....           | 黄吉祥,崔长彩,姜峰,等  | 308 |
| 高校教学实验室危险化学品集中管理实践 .....           | 杨雪苹,金剑,程景     | 313 |
| 高校二级单位安全保障体系的构建与探索 .....           | 吕明泉,徐焯峰,李佳轶,等 | 317 |

### 本期导读

- ▲福州大学程国杨等设计了一个复合非线性控制器,实现对给定轨迹的快速且平稳的跟踪,并在 MATLAB 中建立仿真模型。基于 TMS320F28335 数字信号处理器进行控制算法编程,整个设计最终形成一个综合实验系统。有参考价值。
- ▲中国石油大学(华东)袁新安等研制了高精度隧道磁阻磁场传感器阵列的电磁成像检测探头,开发了管道内壁缺陷电磁成像软件,可实现管道内壁缺陷在线实时成像显示,并及时准确识别与定位缺陷,为管道内壁无损检测教学提供了良好的实验平台。
- ▲西安电子科技大学刘洁怡等将人工智能与实验室建设相融合,进一步提升实验室信息化水平,推进开放性实验教学,实现学生方法转变,提升学生自主实验与创新能力。
- ▲四川大学邱敦国等提出一种基于“双创”智能化实验室开放共享安全策略,对实验室进行全方位安全监测,在实验室发生安全异动时,能及时发出报警信息,有效确保学生开放共享安全。

### 《实验室研究与探索》第十届编辑委员会名单

#### 高级顾问

中国科学院院士 陈竺 陈洪渊 邓子新 冯端 潘际奎 杨叔子 朱清时  
 中国工程院院士 杜善义 林忠钦 刘经南 翁史烈 谢和平 朱静 左铁镛

#### 主任

丁奎岭

#### 副主任

敖天其 毕为民 董林 符宁平 胡国庆 黄开胜 蒋兴浩 李淑云 刘克新 吕厚均 毛继泽 彭华松 荣昶  
 孙小平 唐睿康 唐毅谦 席海涛 熊宏齐 薛照明 杨波 占金华 张爱林 张云怀 周伯明 朱臻  
**编委**  
 毕远强 曹蓓 曹伟元 常亮 陈润 陈晓猛 陈心浩 陈越 池春荣 崔宏伟 丁激文 董华青 董君枫  
 杜刚 方建慧 方岩雄 冯秀芳 傅志刚 盖宏伟 郭均纷 郭平 郭政文 韩卿 韩英霞 何邦进 何佳  
 贺剑 何文科 贺占魁 胡惠君 胡俊红 华亮 黄春麟 黄富贵 蒋开东 蒋卫民 蒋文春 金仁东 荆莹  
 康传红 康智勇 李爱国 李凤 李剑利 李莉 李立光 李明伦 李声威 李天书 李霆 李文中 李彦鸿  
 李震彪 梁勇 廖梦园 廖小平 刘锋 刘福奇 刘刚 刘庆刚 刘仁 刘拥军 刘莞健 刘哲 刘志军  
 陆伟 芦燕 陆振宇 罗一帆 马国杰 马建滨 马腾 毛昌杰 毛奇凰 孟庆繁 农春任 朴虎森 任志波  
 施芝元 史天贵 宋玉梅 宋元 苏楠 孙胜春 孙占久 唐俊峰 陶向阳 汪力君 王建 王强 王树彬  
 王松良 王巍 王伟光 王玉龙 魏永前 伍飞军 吴宏翔 吴金栋 乌兰 吴卫 吴祝武 夏伟 向坚持  
 谢日行 熊龙彪 徐晨 许志龙 薛凌云 杨德嵩 杨端光 杨发福 杨宏云 杨立成 杨旭静 姚丽华 袁洪学  
 袁若 咎凤彪 张彪 张海峰 张守民 张巍 张文 张晓刚 张雅林 张燕勤 张义庭 赵长明 赵冬梅  
 赵红亮 赵明 赵咏芳 赵煜 钟华勇 周晔 朱运利 朱再明 朱正茂 朱竹青 庄志洪  
**特邀编委**  
 楚丹琪 方东红 冯建跃 高欣 管国华 胡今鸿 华子春 姜文凤 雷焱炎 刘宏 吴兵 伍扬 王健  
 王杰 王勤 许宏山 严薇 杨佩青 张林 赵建新 钟冲

#### 编辑部

**主编** 蒋兴浩 **副主编** 彭华松 周伯明 **编辑** 陶世弟 秦富生 秦杏荣 吴炎  
**编务** 刘佃来 杨帆 冯霞 **本期责任编辑** 陶世弟 终审 蒋兴浩

# RESEARCH AND EXPLORATION IN LABORATORY

## ( Monthly )

Vol. 41 No. 3

Serial No. 313

Mar. 2022

Serial paraments; CN31 – 1707/T \* 1982 \* m \* A4 \* 322 \* zh \* P \* 26.00 \* 7150 \* 65 \* 2022-03

### CONTENTS

#### · Experimental Technology ·

|   |   |    |
|---|---|----|
| Rolling Optimization of Biomass Combined Heating and Power Microgrid under Multi Time Scale with Hybrid Energy Storage<br>..... | YANG Xiaohui, ZHANG Liang, LI Zhaohui, et al    | 1  |
| Design of an Exploratory Experiment for Motion Control with Friction Compensation .....   | CHENG Guoyang, LIU Yangyang                     | 8  |
| Dust Detection Method for Underground Coal Mines Based on YOLOv4 Algoritm ...   | CHENG Xuezhen, ZHAO Zhenguo, LIU Kingjun, et al | 14 |
| MXene-Hybridized Silane Film for Construction of Superhydrophobic/Antibacterial Metal Surface Protective Coatings<br>.....      | CAO Meiwen, NIE Yan, WANG Dong                  | 19 |
| Variation of Horizontal Bearing Capacity of Pile Foundation in Saline Soil Environment ...                                      | ZHANG Jianwei, DING Le, FAN Yalong, et al       | 23 |
| Design and Implementation of Improving Reverse Voltage Gain of Bidirectional Full Bridge LLC Resonant Converter<br>.....        | YE Zongbin, WU Zhanfei, DENG Xianming           | 30 |
| Discussion on Quantitative Analysis Method of Soil Microstructure .....   | LI Jiaming, TANG Shibin, BI Pengyan, et al      | 34 |
| Aerodynamic Coefficients Prediction of Overhead Iced Conductor by BP Neural Network.....  | LIU Xiaohui, ZHOU Shun, WANG Shun, et al        | 42 |
| Experiment on the Determination of Acetamiprid with Aptamer Fluorescence Molecular Switch .....                                 | YANG Limin, LI Mingming                         | 50 |
| BPNN Channel Estimation Method for DCO-OFDM System .....  | LI Xiaoji, GAO Tian, YAN Weilong, et al         | 54 |
| Image Colorimetric Determination of Phosphorus Content and Artificial Neural Network Simulation<br>.....                        | GAO Guangqin, LI Ruige, XIE Puhui, et al        | 59 |
| Study on Bending Failure Behavior of Hydraulically Expanded Clad Pipe .....   | YAO Xingjun, FAN Xianyong                       | 63 |
| Influence of Cable Pipeline on Dike Settlement and Seepage in Rudong Offshore Wind Plant .....                                  | HOU Sijia, XU Zhengfeng                         | 70 |

#### · R & D of Instruments and Apparatus ·

|   |  |    |
|---|--|----|
| Design of Experimental Platform for Floor Radiant Heating with Direct-expansion Solar-assisted Heat Pump<br>..... | KONG Xiangqiang, YAN Xunzheng, ZHANG Peng, et al | 75 |
| A Simple Device for Rapid Measurement of R-T Curve of Thin Films .....  | QU Haojie, GUO Yuxian, ZHANG Donghui             | 79 |
| Design of Environmental Monitoring System for Amphibious UAV Based on LoRa Technology<br>.....                    | WANG Ruoyan, LIU Hongwei, WANG Tingyu, et al     | 82 |
| Application of Emperature Ifference Enerator Ased on Te@TeO <sub>2</sub> Anomaterials .....                       | WU Xiaoping                                      | 86 |
| Design of a Two-phase Induction Motor Control Experiment Device .....   | HAN Linrui, DENG Yonghong                        | 90 |
| Design of Video Salient Object Detection System Based on Multi-level Feature Fusion .....                         | BI Hongbo, ZHU Huihui, YANG Lina, et al          | 94 |

#### · Special Topic Discussion——Virtual Simulation Technology (104) ·

|   |  |     |
|---|--|-----|
| Model Predictive Control and Experimental Study of LCL Three-level Grid-connected Inverter<br>.....             | ZHANG Hui, GUO Tao, WANG Jian, et al         | 99  |
| AEB Test Design of Autonomous Vehicle Based on Pre-Scan .....   | YANG Jianjun, NI Xinglong, ZOU Jinbin, et al | 106 |
| Virtual Simulation Experiment of Detonation Velocity Test for Explosive Based on Numerical Simulation<br>.....  | YUAN Junming, XIA Tao, YU Yanwu, et al       | 111 |
| Design of An Intelligent Bird-driven Device Based on Internet of Things Monitoring .....                        | DING Yuhao, LI Dong, WEN Quanlong, et al     | 116 |
| A Watermarking Algorithm Based on Discrete Tehebichef Transformation and LT Codes .....                         | SHI Hongqin, SUN Dan                         | 121 |
| Simulation Research on Cloud Resource Scheduling Algorithm Based on IPSO_CS .....                               | LI Xinfei, XIE Xiaolan                       | 127 |
| A Time-domain Analysis and Parameter Design Method of Quasi-resonant Single-ended Inverter .....                | ZHANG Dehua, FU Xiaocheng                    | 133 |
| Research on An Improved GRAPPA Algorithm Based on Singular Value Decomposition .....                            | WEI Xiaoqin, HE Wenjing, LI Yang, et al      | 139 |
| Development and Verification of High Performance Dual Channel Virtual Oscilloscope via Sparse Sampling<br>..... | JIANG Bin, TANG Yu, BAO Jianrong, et al      | 144 |

#### · Demonstration Center Construction of Experimental Teaching ·

|  |   |     |
|--|---|-----|
| Exploration on the Construction of Modern Physics Laboratory from the Perspective of Learning Space<br>..... | PAN Chongpei, ZHAO Weilu, CHEN Jing, et al      | 150 |
| A Design Method of ARM Register Heap Structure Supporting Nine Working Modes<br>.....                        | ZHANG Fujia, XIE Dengyang, GAO Dingchong, et al | 155 |
| Innovation Education and Practice of College Students Based on STEP Concept .....                            | LIANG Nan, ZHANG Xiao                           | 161 |
| Exploration and Expansion of Experimental Teaching for Fluorescence Analysis .....                           | JIA Li, MA Kaiguo, ZHAO Hao, et al              | 165 |

#### · Experimental Teaching and Innovation ·

|   |  |     |
|---|--|-----|
| Development of Electromagnetic Imaging Teaching Experimental System for Pipe Inner Wall Defects<br>.....            | YUAN Xin'an, ZHANG Guangtai, LI Wei, et al | 169 |
| Experimental Teaching Design of Astronomical Adaptive Optics System .....   | PENG Zhixin, CHEN Liang                    | 174 |
| Cultivating Students' New Drug Research and Development Ability by Organic Chemistry Experimental Teaching<br>..... | CHEN Shaorui, YU Xudong                    | 177 |

|  |  |     |
|--|--|-----|
| Reform and Practice of Experimental Teaching of Computational Materials Science under the Background of New Engineering .....  | GUO Dan, JIN Jianfeng, WANG Mingtao, et al     | 181 |
| Construction and Teaching of Simulation Experiment of Ball and Plate System Based on Unity 3D .....  | GUO Tiezheng, ZHENG Yifeng, CHEN Wei, et al    | 187 |
| Research on the Practice Teaching System with “Three-dimensionality Virtual-Actual Combination” of Integrated Circuit Major .....                                      | LIU Huimin, JIANG Xunyong, SU Lin, et al       | 193 |
| A Teaching Experiment Converted from Scientific Research 3D Printing Blackbody Cone for Seawater Desalination .....  | LU Songtao, WANG Qun, LI Yang, et al           | 198 |
| Practice on Ideological and Political Construction of Practical Courses Driven by Internalization of Learning .....  | GUO Mingjing, XIONG Xin, JING Lin, et al       | 202 |
| Exploration on Using Flow Cytometry to Reform Independent Research-oriented Immunology Experimental Teaching .....   | DOU Huan, QIAO Xiaoyue, FU Juanhua, et al      | 207 |
| Practice and Exploration of Verification Experiment Teaching .....   | FANG Xinkui, GE Haiyan, CHEN Luyong            | 212 |
| Design of Comprehensive Teaching Experiment for Preparation and Application of Re-generated Chrome Tanning Agent .....   | ZHANG Jinwei, HE Xiu                           | 217 |
| Exploration of the Problem-based Learning Mode in Experimental Teaching of Toxicology .....  | GUO Rong, ZENG Ming, GUAN Lan, et al           | 221 |
| Exploration of Mixed Teaching Mode for Pharmaceutical Experiments under the Background of Coronavirus Epidemic .....   | JIANG Linlin, CAO Shuijuan, DING Tingbo, et al | 227 |
| Teaching Practice of Molecular Docking Technology in Pharmaceutical Chemistry Experiment .....   | XI Jiayue, ZHANG Dongxu, NIE Huifang, et al    | 231 |
| Teaching Reform of Thin Layer Chromatography Experiment with the Green Chemistry Perspective .....   | SONG Lili, YIN Hongqing, CAO Ying, et al       | 235 |
| <b>· Training and Practice ·</b>   |  |     |
| Exploration and Practice of Cooperative Education Mechanism of Practice Teaching outside School under the Background of the New Engineering Construction .....         | WANG Ligang, BAI Xiumei, FANG Yanxiong         | 238 |
| Path Planning of Underwater Unmanned Vehicle Based on Curriculum Double Deep Q Network .....   | WANG Yingying, ZHOU Jiajia, GAO Feng, et al    | 244 |
| Exploration and Practice of Problem-oriented Teaching of CNC Turning .....   | WANG Jianwu, JIN Rendong, WANG Chao, et al     | 249 |
| <b>· Laboratory Construction and Scientific Management ·</b>   |  |     |
| Construction and Management of Open Laboratory Based on Artificial Intelligence .....  | LIU Jieyi, ZHOU Jiashe, WANG Xinhuai, et al    | 252 |
| Hotspots and Frontiers Analysis for University Laboratories in Recent Ten Years .....  | ZHEN Lihua                                     | 256 |
| Consideration of Optimal Configuration of Experimental Teaching Laboratory and Management in Agricultural Engineering Specialty Based on Exploratory Experiments ..... | SHEN Mingwei, HAO Feilin, HE Yong, et al       | 262 |
| Research on Evaluation of Maritime University Laboratory under Probabilistic Hesitation and Fuzzy Environment .....  | WANG Zhiping, FU Min, WANG Peiwen              | 266 |
| Exploration on University Laboratory Resource Management Innovation .....  | LENG Xin, JIA Wentao, LI Jianli, et al         | 273 |
| <b>· Laboratory of Arts-Economics-Management ·</b>   |  |     |
| Exploration on the Construction of Digital and Smart Management Laboratories by Using Big Data .....   | CHENG Shanshan                                 | 277 |
| <b>· Supply and Management of Apparatus and Equipment ·</b>  |  |     |
| Research and Practice of the Procurement Management in Universities from the Financial Management Perspective .....  | WANG Jie, SHEN Ying, GAO Hui                   | 281 |
| Construction and Practice of Open-sharing Platform for Large-scale Instruments under the Background of New Agricultural Science .....                                  | WANG Keming, LIU Haoyuan, LIU Zhonghua         | 287 |
| Exploration on Overall Management of Funds for Large-scale Instruments and Equipment in Universities .....   | LI Xuelian, ZHOU Zhiyun, LUO Shuqiang, et al   | 292 |
| Research on the Refined Management of Fixed Assets in Universities Based on PDCA Continuous Improvement .....  | YANG Meirong                                   | 296 |
| <b>· Environment and Safety of Laboratory ·</b>  |  |     |
| Security Strategy on the Opening and Sharing of “Innovation and Entrepreneurship” Intelligent Laboratory .....   | QIU Dunguo, LI Fajun, LIAO Yong, et al         | 300 |
| Design and Practice of Laboratory Safety Education Based on VR Panorama .....  | WANG Yifang, LU Jiayi, WANG Jing, et al        | 304 |
| Analysis of Current Situation of Laboratory Safety Education of Mechanical Postgraduates .....   | HUANG Jixiang, CUI Changcai, JIANG Feng, et al | 308 |
| Practice of Hazardous Chemicals’ Centralized Management in University Teaching Laboratories .....  | YANG Xueping, JIN Jian, CHENG Jing             | 313 |
| Construction and Exploration of Safety Guarantee System for Secondary College in a University .....  | LÜ Mingquan, XU Xuanfeng, LI Jiayi, et al      | 317 |

## Research and Exploration in Laboratory (Monthly, Started in 1982)

**In charge:** Education Ministry, P. R. China

**Published by:** Shanghai Jiao Tong University

**Editor-in-Chief:** JIANG Xinghao

**Edited by:** Editorial Department of Research and Exploration in Laboratory

**Address:** 1954 Huashan Rd., Shanghai, P. R. China

**Zip Code:** 200030

**Tel/Fax:** 86-21-62933165

**Submission:** <http://sysy.cbpt.cnki.net>

**E-mail:** sysy@mail.sjtu.edu.cn

**Issue number:** ISSN 1006-7167  
CN 31-1707/T

**CODEN:** SYTTAZ

# 高性能双通道稀疏采样虚拟示波器研制

姜 斌, 唐 禹, 包建荣, 唐向宏, 朱 芳  
(杭州电子科技大学 通信工程学院 杭州 310018)



**摘 要:** 虚拟仪器技术可有效降低电子类实验室建设的测试仪器投入。针对高校实验教学需求,研制了一款双通道虚拟示波器。该示波器硬件电路采用 STM32 + FPGA 架构,结合压缩感知的随机采样完成低功耗信号采样及恢复,获得采样率 200 MS/s,带宽 100 MB 功能的信号展示功能。在有限的硬件资源基础上,开发了信号发生器、频谱仪等功能,增强了实用性。相比现有同类产品,该示波器具有功耗低、配置灵活、信号测试带宽大及扩展性强等优势,具有较大应用价值。

**关键词:** 虚拟仪器; 双通道; 压缩采样; 现场可编程门阵列; 实验教学

中图分类号: TP 391.4 文献标志码: A

文章编号: 1006 - 7167(2022)03 - 0144 - 06

## Development and Verification of High Performance Dual Channel Virtual Oscilloscope via Sparse Sampling

JIANG Bin, TANG Yu, BAO Jianrong, TANG Xianghong, ZHU Fang

(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The virtual instrument technology can effectively reduce the instrument investment of electronic laboratories. According to the requirements of experimental teaching in universities, a dual-channel virtual oscilloscope has been successfully developed in this paper. The circuit of the oscilloscope uses the STM32 + FPGA architecture. The random sampling and compressed sensing are utilized to achieve low-power signal sampling and recovery. Then, the oscilloscope achieves the function of signal display with a sampling frequency of 200 Msps and a bandwidth of 100 MB. In addition, on limited hardware resources, signal generators, spectrum analyzers are developed together to enhance practicability. Compared with existing products, the oscilloscope has good advantages of low power consumption, flexible configuration, broad signal measurement bandwidth and strong extension and so on, thus it possesses large practical value.

**Key words:** virtual instrument; dual-channel; compression sampling; field programmable gate array; experimental teaching

### 0 引言

通常示波器在发展中可分为模拟和数字示波器。后者因强大的数据处理和波形分析等功能成为主流<sup>[1]</sup>。数字示波器测量信号准确度高,因成本高和不易携带,主要应用于高校及研究所,不适用于紧急通信线路抢修场景。为此,出现了针对具体应用场景,开发小巧易携带示波器产品,缺点是可扩展性差<sup>[2]</sup>。因高精度模数转换器(Analog to Digital Converter, A/D)售价一直较高<sup>[3]</sup>,导致基于该核心器件的高端实验仪

收稿日期: 2021-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1809201); 浙江省基础公益研究计划(LY20F010010); 2021年度杭州电子科技大学高等教育教学改革研究实验技术专项项目(ZXJG202101)

作者简介: 姜斌(1980-),男,浙江衢州人,硕士,高级实验师,研究方向为无线通信、通信实验仪器研制等。

Tel.: 13093705327; E-mail: jiangbin@hdu.edu.cn

通信作者: 包建荣(1978-),男,浙江杭州人,博士,教授,研究方向为无线通信及测量仪器。Tel.: 13588115663; E-mail: baojr@hdu.edu.cn

器成本高。

为消除高速 A/DC 对我国信号处理事业发展的影响,我国学者研发了多种等效 A/DC 采样技术。时间交替并行采样技术<sup>[4]</sup>为主流,该技术以较低成本实现周期及重复信号的高准确度采样,但因多片 A/DC 并行工作,能耗高、同步定时困难造成所需抽样样本数目多。示波器采样信号具有周期性,故频谱具有显著稀疏性。压缩采样基于信号稀疏特性,利用有限采样即可准确重构信号,可有效提升 A/DC 采样效率且降低能耗<sup>[5-6]</sup>。

常用压缩采样信号恢复算法主要有正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)<sup>[5]</sup>及 root-MUSIC<sup>[6]</sup>,上述方法仅利用单一支撑集,易陷于局部最优,造成信号恢复不理想。多路径匹配追踪(Multiple Matching Pursuit, MMP),生成多个候选集并选择最优,有效提高信号准确度。因示波器信号采样无法预知信号稀疏度,故改进了 MMP 算法,获得稀疏度自适

应-MMP(Sparse adaptive-MMP, SA-MMP)方法,并应用至该虚拟仪器,实现高稳定、高准确度的信号恢复,保证了带宽 100 MHz、采样速率 200 MS/s 的双通道虚拟示波器的稳定性能。为方便现场故障排查,还扩展了信号生成,可生成 5~10 MHz 的常用波形。基于计算机的计算算力及硬件资源,增加了频谱仪、扫频仪以及记录仪的功能,增强实用性。研发的虚拟仪器具有功耗低、配置灵活、信号测试带宽大及扩展性强等诸多优势。

## 1 系统总体结构

依据虚拟仪器设计思想,示波器分为硬件电路和 PC 端软件这两大部分。硬件采集并量化外部输入信号,依据 PC 指令设置生成信号波形参数,输出信号,完成信号显示及生成的功能。双通道虚拟示波器系统总体框架如图 1 所示。

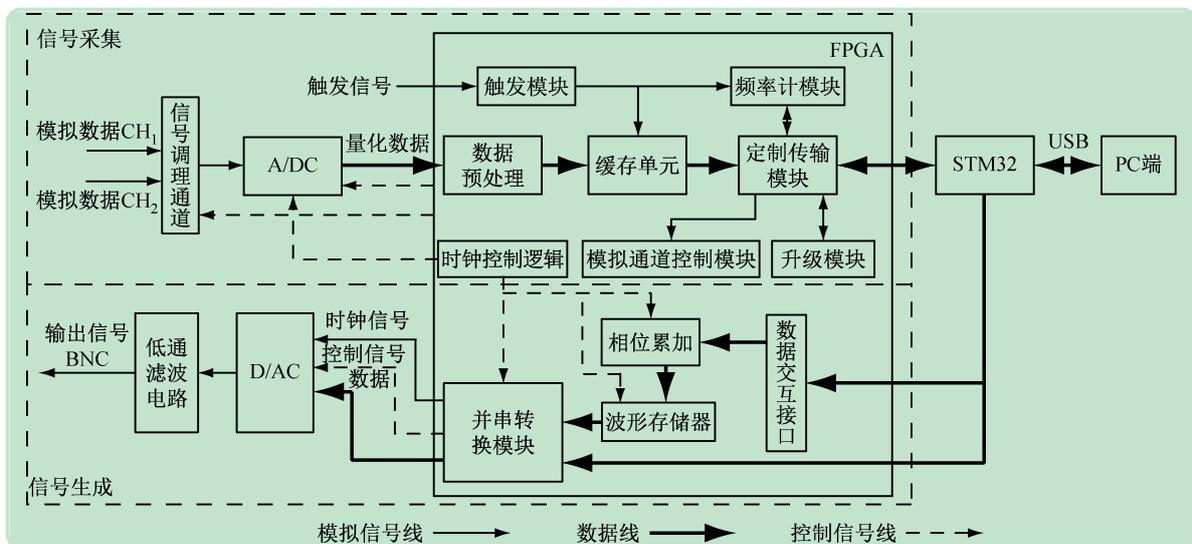


图 1 虚拟示波器总体框架图

通过功能的分类,硬件电路可分为以下几个模块:模拟信号通道、数据采集、微控制器(MCU)、个人电脑(PC)端数据处理和信号生成等模块。其中,信号采集主要由 A/DC、现场可编程门阵列(FPGA)及时钟逻辑控制器等组成,基于 FPGA 平台压缩采样信号,可极大降低采样信号所需的能耗。PC 端采用了采样离散信号,用信号重构算法恢复原始信号。重构算法的选择应遵循尽量少的采样次数实现高质量信号恢复。

## 2 硬件电路设计

硬件系统主要由“STM32 + FPGA”构成。STM32 模块以 STM32F103C8T6 芯片为主控制器,负责与上位机的通信及调控。FPGA 选用 EP1C3T100,分别控制

A/DC 和 D/AC 实现信号采集及生成功能。A/DC 和 D/AC 分别选用 ADS830E 和 AD5721。

### 2.1 信号采集电路设计

信号采集电路主要由模拟信号预处理、触发脉冲控制、信号采样通道控制、模数转换和 FPGA 缓存组成<sup>[8]</sup>。根据采样定理,若要准确重构信号,则 A/DC 工作频率不低于信号最高频率 2 倍,但会造成高能耗。为此,随机等效采样利用非均匀采样,依据触发脉冲与采样时钟时间间隔存储采样值,多次采样完成波形信号重构,实现低奈奎斯特采样频率。

设采样信号时间间隔为  $(0, T_s]$ , 触发时刻与触发后的第 1 个采样时刻的上升沿的时间间隔  $\Delta t_m$ ,  $m$  为随机采样次数。触发采样脉冲理想且不重复的情况

下,需要采样次数有  $N = T_s / \Delta t_m$ 。但在实际中,脉冲随机生成。故  $\Delta t_m$  在  $(0, T_s]$  区间为非均匀分布,实际采样次数要多于  $N$  次。针对采样样本数少导致信号重构失败的问题,引入压缩采样技术。

为保证压缩采样信号准确还原,采样矩阵需便于硬件实现。在此,利用 Whittaker-Shannon 构建采样矩阵<sup>[5]</sup>。故采样信号  $y$  与原始信号  $x$  有下式:

$$y(\Delta t_m) = \sum_{n=1}^N x(nT_e) \sinh\left(\frac{\Delta t_m}{T_e} - n\right) \quad (1)$$

式中:  $n$  为信号级数展开项的序号;  $m$  为随机采样次数,不大于准确重构原始信号最低采样次数,且  $m \leq M$ ;  $T_e$  为等效时间采样周期。将式(1)改写为矩阵形式,则有:

$$\begin{bmatrix} y(\Delta t_1) \\ y(\Delta t_2) \\ \vdots \\ y(\Delta t_M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \phi_{1,2} & \cdots & \phi_{1,N} \\ \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \cdots & \phi_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{M,1} & \phi_{M,2} & \cdots & \phi_{M,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(T_e) \\ x(2T_e) \\ \vdots \\ x(NT_e) \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} \quad (2)$$

式中  $\phi_{m,n} = \text{sinc}\left(\frac{\Delta t_m}{T_e} - n\right)$ 。在硬件电路中  $\Delta t_m$  的测量主要基于恒流源电容充放电实现。因传输信号  $x$  在频域具有稀疏性,则利用稀疏基  $\Psi$  将信号  $x$  转换至频域,  $\mathcal{Y}_{i,k} = e^{j2\pi(i-1)(k-1)}$ ,  $i, k = 1, 2, \dots, N$ , 有下式:

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \Psi \boldsymbol{\alpha} \quad (3)$$

式中:  $\boldsymbol{\alpha}$  为稀疏度为  $K$  的稀疏信号,有效降低 A/DC 芯片工作负荷。

## 2.2 信号生成电路设计

信号生成电路利用直接数字信号合成(DDS)中的数字频率合成技术<sup>[9]</sup>。该模块主要包括主控芯片 STM32、FPGA 和 D/AC。信号生成主要步骤如下:

步骤 1 PC 端设置生成信号参数,依据协议编码指令,并由 USB 转发至 STM32;

步骤 2 STM32 解析指令,初始化 D/AC,并生成指令发送至 FPGA;

步骤 3 FPGA 读取 STM32 指令并利用查表方式读取 ROM 固有波形信息,并完成相位累加、RAM 读写和并串转换的时序逻辑控制,并生成指令下发至 D/AC;

步骤 4 D/AC 在时钟逻辑控制下输出对应波形。D/AC 为 AD5721 芯片,可生成信号频率范围为: 5 Hz ~ 10 MHz。

## 3 软件电路设计

软件模块主要包括通信、采样、恢复及仪器驱动程序等。

### 3.1 通信电路设计

STM32 作为一种集成多功能及成熟开发库的芯

片,具有稳定、快速的特点,选用 STM32 连接硬件电路与 PC 通信。利用高速 USB 保证 PC 端信号稳定传输至 STM32,STM32 基于指令译码,并下发至 FPGA 及周边电路,FPGA 与 STM32 通信流程如图 2 所示。

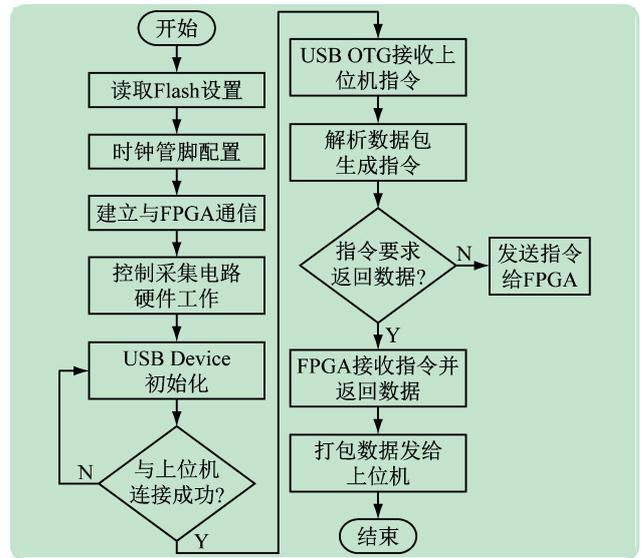


图 2 STM32 通信工作流程图

PC 端给 STM32 发送初始化指令,STM32 读取 Flash 中固有数据,初始化并设置时钟。STM32 连接 FPGA,采集信号并储存数据至 FIFO 中,将一定量的数据发送至 PC 端,完成信号采集。STM32 作为主控模块,依据指令要求,选择生成或采样信号,基于异步通信协议激活信号采样和生成功能。

### 3.2 压缩采样信号恢复电路设计

压缩感知可利用有限采样样本,准确重构原始信号。但因接收端未知信号稀疏度  $K$ ,故需利用穷尽方式选择性重构信号,每次采样都会造成能耗,时间及存储成本增加。信号重构需以尽量少的次数完成。

为满足上述要求,本文提出的 SA-MMP 算法的目标是在未知  $K$  条件下恢复原始稀疏信号。基本思想为:

- (1) 估计方法估计信号稀疏度  $K$ ;
- (2) 基于估计得到的稀疏度  $K$ ,构建深度为  $K$  的二叉搜索树模型;
- (3) 利用深度搜索方式,寻求满足阈值的最优解。

按深度优先搜索的路径按次序生成,可有效避免路径重复遍历,降低存储负担。

#### 3.2.1 稀疏度估计

利用匹配测试得到原子集合,即真实稀疏度  $K_0$  略小于  $K$ 。假设第  $m$  次采样能够有效地恢复信号,接收信号  $y$  的真实支撑集为  $\Omega$ ,用  $|\cdot|$  表示势,有  $|\Omega| = K$ 。令  $f = \Phi^* y$ ,设  $f$  的第  $i$  个元素为  $f_i$ ,且  $f$  为压缩感知的中间投影矩阵变量,“\*”为预设值。取  $|f_i|$  前  $K_0$  ( $1 \leq K_0 \leq N$ ) 最大值索引得集合为  $\Omega_0$ ,则  $|\Omega_0| = K_0$ 。因  $\Phi$

满足有限等距离性质 (Restricted Isometry Property, RIP) 性质, 故若  $K_0 \geq K$  且  $\delta_k$  是预设偏差量, 有:

$$\|\Phi_{r^0}^* y\|_2 \geq \frac{1 - \delta_k}{\sqrt{1 + \delta_k}} \|y\|_2 \quad (4)$$

稀疏度估计方法:  $K_0$  取初始值为 1, 若  $\|\Phi_{r^0}^* y\|_2 < \frac{1 - \delta_k}{\sqrt{1 + \delta_k}} \|y\|_2$ , 则  $K_0 = K_0 + 1$ , 直到不等式成立。

### 3.2.2 稀疏多径匹配信号估计

MMP 算法在 OMP 算法估得的索引基础上扩增候选索引集, 并基于索引集扩增多个候选集, 形成多个路径, 类似于二叉树形结构。将每一个候选集视作叶子节点, 将残差最小候选集转化为树搜索问题。

MMP 算法主要由稀疏度  $K$  及路径数  $S$  控制。每次迭代过程中, 对当前候选集先通过计算内积, 选出残差最为匹配的  $S$  个原子, 在将该原子依据路径数分为  $S$  组, 并将其加入到当前索引集, 生成下一级迭代的  $S$  个索引集。经迭代, 将产生多个索引集, 并逐路径选择最优支撑集, 实现数据重建。该算法通过增加候选集数目, 提升选择正确索引的概率。但基于层序遍历的树最优解搜索, 路径存在重合, 需存储候选集, 计算负担较大。因此, 引入深度遍历搜索算法, 有效避免从顶层开始计算多条路径候选集, 降低计算量, 提升信号重构准确度。

### 3.2.3 采样判决停止步骤

设第  $M$  次采样利用稀疏度自适应多路径匹配 (SA-MMP) 重构信号为  $x_M^\#$ ,  $M + 1$  次采样后的信号为  $x_{M+1}^\#$ , 有  $x_{M+1}^\# = x_M^\#$ , 则采样性能收敛, 利用  $M$  次采样即可有效恢复原信号。

故采样信号采样判决停止步骤如下

步骤 1 执行第  $i$  次采样, 则依据采样得到的相对位置, 构造测量矩阵有  $\Phi_i = [\phi_1 \dots \phi_i]^T$ , 依据采样序列  $y_i = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_i]^T$ , 并结合 MMP 重构信号得  $x_i^\#$ 。

步骤 2 执行第  $i + 1$  次采样, 构造测量矩阵有  $\Phi_i = [\phi_1 \dots \phi_{i+1}]^T$ , 利用  $y_{i+1} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{i+1}]^T$ , 利用  $y_{i+1}$  重构得到  $x_{i+1}^\#$ 。

步骤 3 判断  $x_i^\# = x_{i+1}^\#$  是否成立, 若成立, 则停止采样, 否则重复步骤 2。综合 3.2.1、3.2.2 及 3.2.3 得到信号流程如图 3 所示。

### 3.3 仪器驱动程序模块设计

驱动程序模块主要由仪器关闭和启动、通道控制、水平控制、触发控制、数据采集、自动设置和波形生成等模块组成<sup>[9]</sup>。用户使用 UI 界面设置各模块参数。其功能组成框架如图 4 所示。

PC 端启动上位机示波器软件, 发送指令初始化硬件电路, 建立硬件电路与 PC 端的通信连接。仪器软件关闭, PC 断开与硬件电路连接, 释放 PC 端及硬件

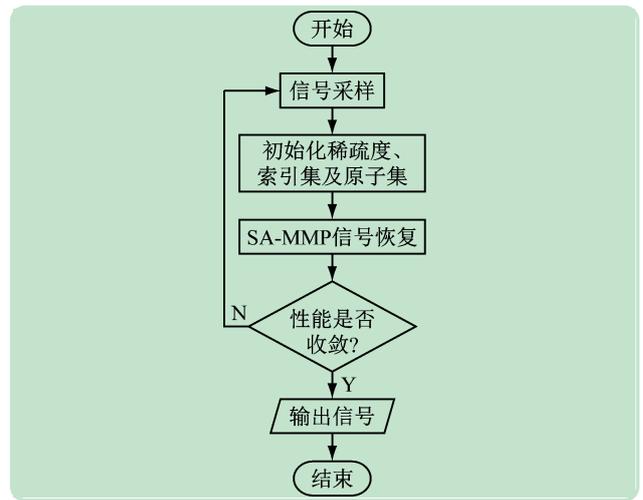


图 3 信号恢复流程图

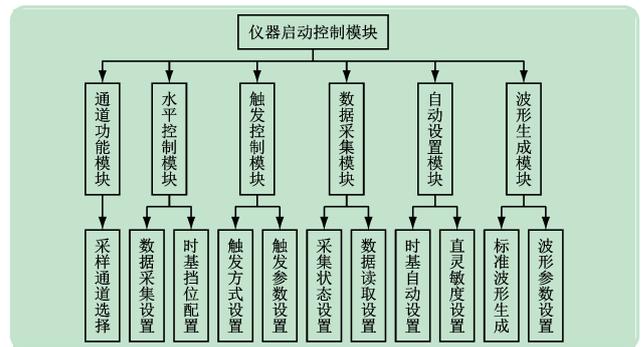


图 4 仪器驱动模块组成框架图

缓存。

通道控制模块主要控制信号采样通道。水平控制模块主要设置采样方式和时基档位。

触发控制模块主要控制硬件电路触发脉冲, 确保精准的时基定位, 使波形稳定显示。模块主要包括 2 个设置, 即触发方式及参数设置。触发参数因成本和硬件资源限制, 主要调控是触发极性和电平。自动设置模块在系统启动时, 默认设置时基和波形灵敏度。波形生成模块存储各标准生成信号, 在选定某波形后, 将该波形信息传输至信号生成电路, 得到特定频率及幅度波形<sup>[11]</sup>。

## 4 虚拟示波器样机的实验测试

### 4.1 信号恢复性能测试

为测试 SA-MMP 信号恢复的正确性及有效性, 将本文的改进算法与 OMP 比较。实验是在 CPU 型号为 Intel(R) Core(TM) i5-8250U 的笔记本上执行的实验, 分别探究稀疏度及采样次数对接收信号的影响, 信号重建概率分别如图 5、6 所示。实验设置重构成功阈值  $\varepsilon = |\hat{x} - x| \leq 10^{-4}$ , 蒙特卡洛次数为 1 000 次, 统计重构成功的次数。

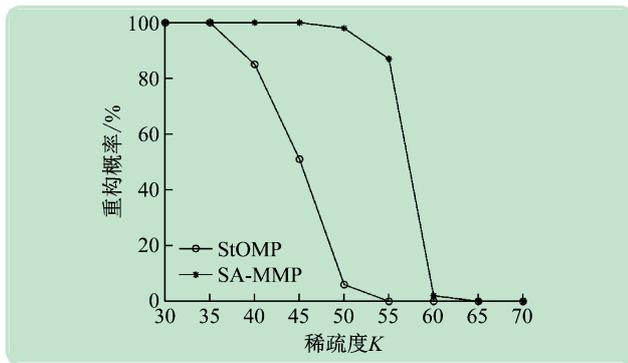


图 5 不同稀疏度两种算法重构概率

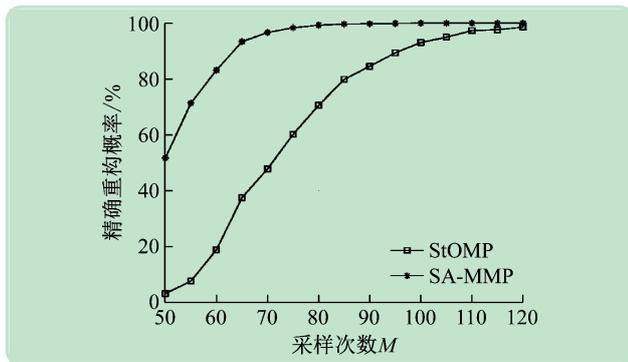


图 6 不同采样数两种算法重构概率

如图 5 所示信号长度为 256, 采样矩阵为 Whittaker-Shannon 矩阵, 采样 128 次, 不同稀疏度对信号重构的影响。此处, 稀疏度设置为 [30, 70], SA-MMP 搜索树的宽度为 4。由图 6 可见, 本文所提 SA-MMP 算法要明显优于传统的 OMP 算法, 当稀疏度  $K$  为 40 时, OMP 算法的重构概率低于 90%, 之后性能将急剧下降。SA-MMP 算法仍能保持 100% 信号重构。当稀疏度为 55 时, OMP 算法无法重构信号, 但 SA-MMP 仍能保持 87% 左右的重构概率。SA-MMP 引入了多路径候选集, 因此 SA-MMP 在较大稀疏度  $K$  仍保持良好性能。图 6 为稀疏度为 30 时, 采样次数对信号重构的影响。由图 6 可见, 当 OMP 实现 90% 以上重构成功率, 则需采样 95 次左右。而所提算法仅需 64

次即可。故 SA-MMP 需要的采样样本数更低, 并极大降低了对 A/DC 的准确度要求。各个压缩恢复算法的运行时间, 见表 1。SA-MMP 因稀疏度估计原因, 运行时长略高于 OMP, 仅相差 0.41 ms, 结合 SA-MMP 所需信号采样样本数更少, SA-MMP 可实现更快信号重构。

表 1 不同恢复算法 CPU 执行时间

|         | 信号恢复方法 |        |
|---------|--------|--------|
|         | OMP    | SA-MMP |
| 运行时间/ms | 4.72   | 5.13   |

#### 4.2 虚拟示波器效果测试

根据上述方案研制的虚拟示波器样机, 同时具备示波器以及信号发生器功能。将 PC 端通过 USB 与硬件电路相连接, 启动软件, 点击“Start Device”启动示波器功能, 点击右侧的“高级”设置信号发生输出信号参数。

图 7 所示为示波器系统测试图。分别连接信号发生端至数字示波器 DS1152E 及虚拟示波器, 输出频率为 1 kHz 的不同波形。收集不同情形虚拟示波器与数字示波器测量结果, 结果见表 2。由表 2 可见, 虚拟示波器能够准确测定信号频率, 幅值测量尚存在一定误差。但信号误差波动也仅在 1% ~ 3%, 基本满足日常实验教学所需。



图 7 系统工作效果测试

表 2 虚拟数字示波器测量结果对比

| 波形              | 正弦波     |       |       | 方波      |       |       | 三角波     |       |       |
|-----------------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
|                 | DS1152E | 虚拟    |       | DS1152E | 虚拟    |       | DS1152E | 虚拟    |       |
|                 |         | CHA   | CHB   |         | CHA   | CHB   |         | CHA   | CHB   |
| 最大值 $U_m/V$     | 1.47    | 1.447 | 1.419 | 1.52    | 1.447 | 1.399 | 1.35    | 1.395 | 1.339 |
| 峰峰值 $U_{p-p}/V$ | 2.92    | 2.84  | 2.86  | 2.92    | 2.84  | 2.78  | 2.64    | 2.74  | 2.68  |
| 频率 $f/kHz$      | 1.00    | 1.00  | 1.00  | 1.00    | 1.00  | 1.00  | 1.00    | 1.00  | 1.00  |

除实现示波器及信号发生器功能外, 还可进一步扩展软件功能。基于硬件电路信号采集功能, 对采样插值后的数据做离散傅里叶变换 (Discrete Fourier

Transform, DFT), 可得到信号频域数据, 将数据在 PC 端显示得到频谱分析仪的功能, 如图 8 所示。利用 PC 端可控制生成信号频率, 设置步进频率, 可输出扫频信

号,实现扫频仪功能,如图9所示。



图8 频谱分析仪功能界面

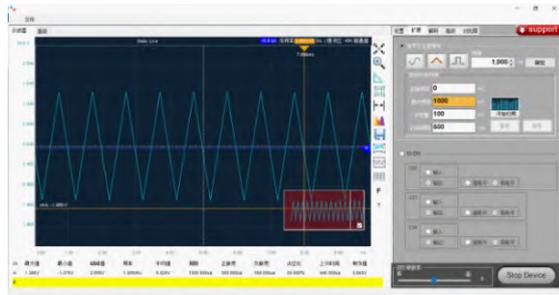


图9 信号发生器和扫频仪功能界面

此外,为方便工程师回顾历史数据波形,增加了无纸记录仪的功能。点击 REC 按钮即可对当前的波形进行记录,以星号\*.osc 文件名保存,记录容量大小受限于计算机存储容量。实现上述功能后,进一步测试示波器硬件电路的各项指标,由表3可得到结论:各项参数基本符合项目目标要求。

表3 虚拟示波器硬件电路模块各项参数

| 测试参数                       | 技术指标        | 实测结果 |
|----------------------------|-------------|------|
| 采样速率 $S/(MS \cdot s^{-1})$ | 240         | 218  |
| 工作带宽 $B/MB$                | 100         | 符合   |
| 工作电压 $U/V$                 | $5 \pm 3\%$ | 符合   |
| 信号时延 $T/ms$                | $\leq 1$    | 符合   |
| 能耗 $P/W$                   | 2.5~3.5     | 符合   |

## 5 结 语

本文主要论述了基于稀疏采样的高性能双通道虚拟示波器的研制。该虚拟示波器采用 STM32F103 作

为主控芯片,利用 EP1C3T100 和其他外围电路实现了示波器、信号发生器功能。为提升信号采样效率,利用 FPGA 芯片丰富的存储计算资源,基于非均匀采样采样信号,利用 SA-MMP 恢复信号,实现信号高质量测量、恢复。为充分利用硬件资源,进一步扩展频谱仪,信号发生器的软件功能<sup>[15]</sup>。该示波器具有体积小、易携带和多功能等特点,具有广阔应用市场,可为同类产品的设计提供借鉴思路。

## 参考文献(References):

- [1] 胡 力. 基于虚拟仪器的移动互联开放实验室探索[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(10): 264-267.
- [2] 姜 斌,李丰璞,包建荣,等. 低成本功能可扩展虚拟示波器研制及验证[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(7): 62-67.
- [3] 芦潇静. TI 最新数据转换器树立行业新标准[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2019, 19(1): 92.
- [4] 邱渡裕,田书林,叶 芃,等. 基于并行结构的随机等效时间采样技术研究及实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1669-1675.
- [5] 赵贻玖,戴志坚,王厚军. 基于压缩传感理论的随机等效采样信号的重构[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 247-251.
- [6] 庄晓燕,赵贻玖. 谱稀疏信号随机等效采样重构方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1507-1512.
- [7] Kwon S, Wang J, Shim B. Multipath matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(5): 2986-3001.
- [8] 郑争兵,魏 瑞,陈正涛. 一种基于 FPGA 的高速数据通道的实验方法[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(12): 78-81.
- [9] 吴 涛,徐春燕,彭 宏. 基于 FPGA 的信号与系统实验箱信号源设计[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(6): 44-47.
- [10] 张宝东,秦石乔,王省书,等. 虚拟数字存储示波器中 A/D 动态性能的研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1700-1703.
- [11] 唐俊龙,文 桢,陈益如,等. 一种新型信号源与示波器虚拟一体机的设计[J]. 电子测试, 2020(12): 13-15, 43.
- [12] 丁红斌,秦会斌,孙顺远. 基于 STM32 的虚拟示波器的设计与实现[J]. 电子器件, 2009, 32(6): 1007-1010.
- [13] 吕向阳,陈明义. 嵌入式系统创新实验室建设[J]. 实验室研究与探索, 2005, 24(5): 32-33, 106.
- [14] 曾 山,陆尧胜,王思华,等. 基于 LabVIEW 的信号发生器和虚拟示波器综合测试仪的设计[J]. 医疗设备信息, 2006, 21(11): 10-11.
- [15] 范海英,杨 嘉,张金凤,等. 基于 LabVIEW 的虚拟信号发生器和示波器设计[J]. 实验科学与技术, 2013, 11(4): 42-43, 104.

### · 名人名言 ·

想像力比知识更重要,因为知识是有限的,而想像力概括着世界的一切,推动着进步,并且是知识进化的源泉。严格地说,想像力是科学研究的实在因素。

——爱因斯坦

## 获奖:

中国高校特色科技期刊  
中国高校优秀科技期刊  
《CAJ-CD规范》执行优秀期刊  
全国高校优秀编辑质量科技期刊  
华东地区优秀期刊  
上海市高校优秀科技期刊

## 入选下列网站、数据库及检索系统:

- 《中国学术期刊(光盘版)》
- 《中国期刊网》
- 《万方数据——数字化期刊群》
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》
- 《中文科技期刊数据库》
- 《中文电子期刊服务》
- 《中国学术期刊文摘》(中文版)
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- 美国《化学文摘》(CA)
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA)
- 美国《乌利希国际期刊指南》(UIPD)
- 英国《INSPEC》数据库
- 美国《史蒂芬斯数据库》(EBSCOhost)

---

### 实验室研究与探索 Shiyanshi Yanjiu yu Tansuo

(月刊, 1982年创刊)

第41卷 第03期 总第313期

2022年3月25日出版

### Research and Exploration in Laboratory

(Monthly, Started in 1982)

Vol. 41 No. 03 (Serial No. 313)

March. 25, 2022

---

主办: 上海交通大学

主编: 蒋兴浩

编辑出版: 《实验室研究与探索》编辑部

地址: 上海市华山路1954号

上海交通大学教学三楼456、457室

邮编: 200030

电话: (021) 62932952 62932875

广告热线: (021) 62933165 (带传真)

在线投稿网址: <http://sysy.cbpt.cnki.net>

电子邮箱: [sysy@mail.sjtu.edu.cn](mailto:sysy@mail.sjtu.edu.cn) (办公)

[sysydk@163.com](mailto:sysydk@163.com) (订刊)

[sysygy@163.com](mailto:sysygy@163.com) (广告)

网址: <http://sysy.cbpt.cnki.net>

印刷: 常熟市双乐彩印包装有限公司

广告经营登记证: 3101045000324

国内统一连续出版物号: CN 31-1707/T

国际标准连续出版物号: ISSN 1006-7167

国际期刊编码: CODEN: SYNTAX

国内发行: 上海市报刊发行局

发行范围: 国内外公开发刊

邮发代号: 4-834

定价: 26元/册