

便携式雷达电源检测维修系统设计

刘健鹏, 刘明通, 杨鹏, 沈梁, 武翔

(中国人民解放军 61191 部队, 杭州 310023)

摘要: 针对某大型相控阵雷达装备电源系统维修过程中型号多、数量大、维修周期长、检测维修难的问题, 设计了一种便携式电源检测维修系统; 该系统由 FPGA 核心板、数据采集板、ePC-K70-Lite-L 一体化模组组成, 集成维修人员故障维修经验, 通过数据处理及故障诊断软件分析采集的电源数据, 最终实现对多种类电源故障的快速检测维修; 该系统可对该型雷达 3 大类 13 种电源实现在线控制、参数读取和赋值, 最多同时可对 7 组电源参数实现在线检测, 测试时间由 5 分钟缩短到 10 秒内, 电源检测准确率达 99% 以上, 不依靠外接电源可连续工作达 5 小时以上; 本系统投入使用 4 年以来, 运行稳定、易于操作维护, 检测维修多种类电源达 800 余次, 极大提高了装备的自主保障能力和维修效率, 提升了装备的任务执行成功率。

关键词: 雷达; 组合电源; 故障诊断; Qt/embedded; 一体化模组

Design of Portable Radar Power Detection and Maintenance System

Liu Jianpeng, Liu Mingtong, Yang Peng, Shen Liang, Wu Xiang

(Unit 61191 of the Chinese people's Liberation Army, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the characteristic of multiple models, large quantity, long maintenance cycle, difficult detection and maintenance in the testing and maintenance process of a large phased array radar, a portable power detection and maintenance system was designed to solve these problems. The system is composed of an FPGA core board, a data acquisition board and an ePC-k70-lite-L integrated module. According trouble clearing experience of maintenance, analyzing the collected data of fault diagnosis software, fast detection and maintenance of multiple kinds of power supply failure are supported. The system can realize online control, parameter reading and assignment of 13 power supplies of three types of a certain type of radar, and can realize online monitoring of up to 7 groups of power parameters at the same time. The test time is shortened from 5 minutes to less than 10 seconds, and the power detection accuracy rate is up to 99%, without relying on external power supply, work continuously for more than 5 hours. Since the system has been put into use for 4 years, it has been stable in operation and easy to operate and maintain. It has tested and repaired various types of power supplies for more than 800 times, which has greatly improved the equipment's independent support capability and maintenance efficiency, and improved the success rate of equipment mission execution.

Keywords: radar; combined power; fault diagnosis; Qt/embedded; integrated module

0 引言

大型预警相控阵雷达是一个国家综合实力的重要体现, 是各大国争相发展的战略力量。而大型相控阵雷达分系统多、设备量大、运维难度高, 也给一线装备保障人员提出了很高的要求。大型相控阵雷达中的各分系统为保证正常工作通常需要配备多种型号电源, 在实际工作中因电源种类繁多、数量庞大、测试困难、不易拆装、返厂维修周期长^[1], 且故障定位比较困难, 给装备维修工作带来诸多不便, 不利于雷达系统作战效能的充分发挥。因此能够快速对电源系统进行故障定位, 完成对故障电源的自主维修显得尤为重要, 是装备保障工作的一个重要工作。

大型相控阵雷达为保证较大的探测距离和较高的探测精度, 发射功率是一个重要性能指标, 其发射峰值功率可达兆瓦级, 配备的 T/R 组件数量少则上千, 多则上万, 为 T/R 组件中功率放大器提供能量的电源数量同样庞大。各

分系统中为译码器、移相器、低噪声放大器、各种传感器和刀片式插箱供电而配备的电源也有多种型号。雷达中用到的航空电缆插头均输出多种电压, 且此航空插头管脚多且密集, 测试难度大, 测试操作中具有一定危险性。

本文采用“FPGA+ARM”的硬件架构作为通信控制中枢, 与自主研发的 A/D 数据采集板和通用化 ePC-K70-Lite-L 一体化模组配合完成某型雷达多种电源的测试工作, 构建了一套手持便携式电源诊断维修系统^[2]。实际使用中, 可对某型雷达 3 大类 13 种电源实现在线控制、参数读取和赋值, 可实现同时对一个航空插头内最多 8 组电源参数的检测, 测试时间由原来的 5 分钟缩短到 10 秒内, 电源参数检测准确率达 99% 以上, 依靠其自身供电连续工作达 5 小时以上, 达到现场对电源进行快速故障诊断^[3]、定位和维修的目标, 提高了自主维修能力和维修效率, 缩短了电源类故障的修复时间。

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-11-17。

作者简介: 刘健鹏(1982-), 男, 安徽界首人, 硕士, 高级工程师, 主要从事装备技术保障方向的研究。

引用格式: 刘健鹏, 刘明通, 杨鹏, 等. 便携式雷达电源检测维修系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 141-145.

1 系统组成与工作原理

该便携式电源检测维修系统主要由 FPGA 核心板、电源测试采集板、ePC-K70-Lite-L 一体化模组、电池及配套测试连接电缆组成,除测试连接电缆外其它设备均安装在同一个小型机箱(30 cm×20 cm×8 cm)内,系统设计框图如图 1 所示。丰富的硬件资源结合灵活的数据分析及故障诊断软件,在人机交互界面的调度下,充分利用剪裁式操作系统的低功耗、稳定性和灵活性。

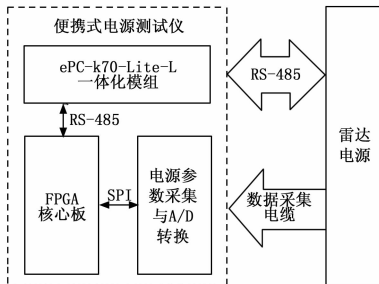


图 1 便携式电源测试仪系统设计框图

该电源检测维修系统通过 ePC-K70-Lite-L 一体化模组内运行的数据分析处理及故障诊断软件的人机交互界面启动电源测试任务,一体化模组通过 RS-485 总线发送采集控制指令到 FPGA 核心板。首先,设置 FPGA 核心板数据采集模块工作状态,采用专用测试电缆将多组被测数据同时传输至机箱,完成采集和量化后,经 SPI 总线^[4]从电源参数采集与 A/D 转换模块获取测试数据,送 FPGA 核心板内进行数字滤波处理,最后再传输到 ePC-K70-Lite-L 一体化模组内的数据分析及故障诊断软件完成可监测组合电源的参数读取、诊断、修改和故障定位维修。

因大型雷达电源数量庞大,通常会在电源内部设置地址码,以方便对其位置进行索引。而在实际使用过程中,由于器件损坏、备件更换等原因,导致新安装的电源内地址码与实际位置不符,需要及时进行修改,避免因地址码错误造成装备电源检测故障。另外,可监控电源内各参数根据比例偏移函数(K、B 值)会对采集到的数据进行修正以显示真值,由于出厂设定或受恶劣电磁环境影响,会造成检测到的值与真值不符,造成电源故障检测的误判。在人机交互界面设置正确的地址码和合适的 K、B 值,通过 RS-485 通信总线可在线实现地址码和 K、B 值的读取和重新赋值,提高了电源监测的准确性,有效提升维修效率,降低维修复杂度,可满足电源测试通用性、灵活性、即插即用的要求。

2 硬件设计方案

本系统主要功能模块全部放置在一个小型机箱内,采用 4 块 2 000 mAh 的可充电锂电池(型号:68750)供电,续航能力大于 5 小时,可满足日常检修需求。

2.1 基于 FPGA 的自适应数字滤波核心板设计

某型雷达天线楼内电磁环境恶劣,对电源参数采集有一定影响,特别是对低纹波电源数据采集影响较大,严重时会导致性能已经有所下降的电源不能及时发现,形成误判,造成潜在故障隐患。通过对现场干扰信号监测和分析可知,主要干扰源为雷达工作频段的副瓣信号和 10 kHz 的 PWM (pulse width modulation) 信号,如图 2 所示。

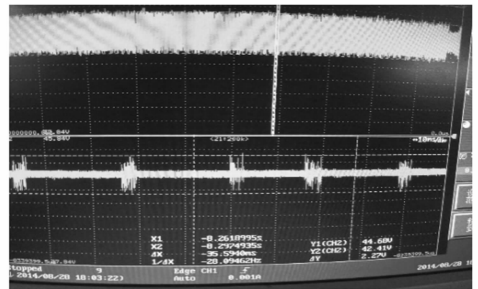


图 2 10 kHz 的 PWM 干扰信号

为去除干扰对电源测试的影响,常用的软件滤波算法对 PWM 信号类型和周期性脉冲类型的干扰处理效果不佳,而数字滤波算法具备较高的精度和稳定性,可根据应用场景更改系统函数,灵活性高,在 FPGA 中容易实现。通过选择合适的 FIR 滤波器系统函数,可有针对性地过滤上述特定干扰信号,具有较好的滤波效果,满足在复杂电磁环境下电源参数精密测量的需要。利用 MATLAB 工具箱编写滤波器函数,生成了由恒定电平、10 kHz 的 PWM 信号、脉冲(100 Hz 的占空比为 2% 的脉冲信号)调制的中心频率为雷达工作频点的线性调频信号的混合信号,如图 3 所示。

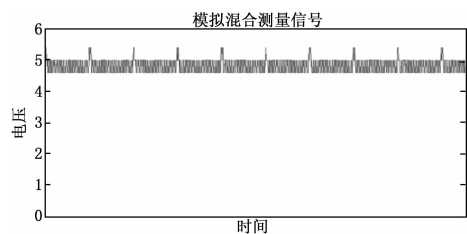


图 3 模拟混合测试信号

为获得最佳滤波器性能,通过对比观察输入输出频谱,综合考虑处理速度和效果,最终确定滤波器级数为 18,截止频率为 200 Hz。滤波效果如图 4 所示。

FPGA 核心板选用 Altera 公司 Cyclone 系列 FPGA 芯片作为核心芯片^[5],其具有可配置 FIR 滤波器的 IP 核。选择使用矩形窗函数的 FIR Compiler V13.0 的 IP 核^[6],根据仿真结果,完成滤波器参数配置,将采集的数据进行滤波处理,其信号处理流程逻辑框图如图 5。

当便携式电源检测维修系统工作时,由一个 20 MHz 的高稳晶振为 FPGA 提供工作时钟^[7],时钟分配模块采用 FPGA 芯片提供的时钟分配解决方案,利用其内部锁相环为各

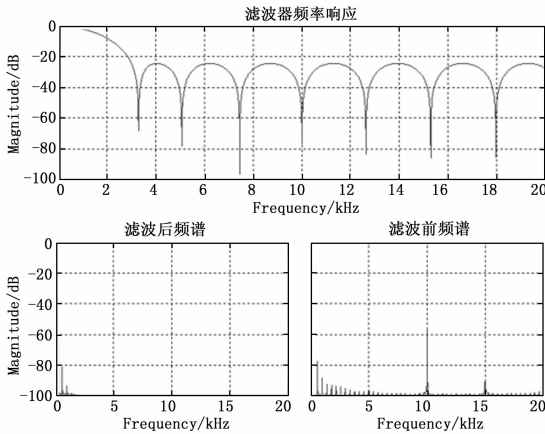


图 4 滤波效果

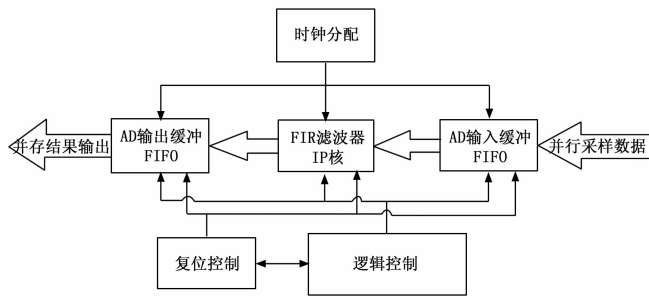


图 5 FPGA 核心板设计逻辑框图

功能模块配置时钟。FPGA 核心控制板通过 RS-485 总线与 ePC-K70-Lite-L 一体化模组进行交互, 一体化模组向 FPGA 核心板下发被测电源标准配置参数, 经 FPGA 译码后配置内部资源, 选通所需测试电源对应的接口, 而后开始进行电源数据采集。将采集到的并行数据存入输入缓冲, 在系统时钟调度下完成串并转换, 在 FIR 滤波器 IP 核中实现数据分组的滤波处理后, 最后将分析处理完的数据传至输出缓冲, 并最终传送至数据分析处理及故障诊断软件进行数值分析和故障诊断定位。

2.2 电源参数采集及 A/D 转换电路设计方案

电源参数采集及转换电路主要完成多种类电源参数的采集与转换功能^[8], 其采集的速度及精度直接影响到整个测试设备的工作效率和性能。为了能够使后端 A/D 转换电路得到稳定增益, 选取 Ad8664 芯片, 它采用 ADI 公司的 DigiTRim^[9]调整技术, 四路轨到轨输出、单电源放大器, 具有低输入偏置电流、低噪声、低失调和宽带宽等特性组合优势。其硬件设计框图如图 6 所示。

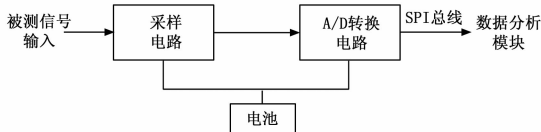


图 6 电压信号采集及转换电路设计框图

某型雷达电源维修中, 在一个航空插头内最多需对 8 组电源进行同时检测, 故 A/D 转换电路选用 MXA1270 芯片, MXA1270 是 8 通道、多量程双极性输入、串行输出、逐次逼近型 12 位 A/D 转换器, 最高采样率为 110 ks/s。在单 +5 V 电源供电下, 可通过编程实现多种不同量程, 满足电源制式和测试精度的需求。FPGA 核心板通过 SPI 总线完成对 ADC 的配置, 12 位测试量化数据的读取并传送至数据分析模块进行后续处理分析。

3 系统运行环境部署和软件设计方案

为保证设备的便携性及长续航特性, 系统各子模块需尽量降低功耗, 使系统能够在有限电量条件下获得最大续航, 同时保证操作的便捷性, 一体化模组需提供不小于 800 * 600 分辨率显示, 并保证触摸输入及良好的用户交互体验。经实际测试, 运行了根据需要裁减与移植的 Linux 系统后, 配备基于 ARM9 的低功耗三星 S3C2410 芯片核心板的一体化模组的功耗可控制在 1.5 W 以内, 符合系统低功耗的要求。因 S3C2410 芯片主频仅为 400 MHz, 为保证用户体验, 操作系统摒弃了 GTK 图形环境, 选用了基于直接帧缓冲的 Qt/embedded 作为图形接口。其应用程序可以直接写入内核帧缓冲区, 通过 Qt/embedded 开发的交互软件在占用很少系统资源的前提下, 完成了在 S3C2410 上的移植与部署^[10], 实现了较完善的人机交互环境。

3.1 基于 ARM 的嵌入式 Linux 系统裁减与配置

一体化模组内运行的系统移植基于 arm-linux-gcc-

4.3.2 编译环境主要分为两个部分。

1) BootLoader 的移植:

ARM 处理器启动主要过程主要分为 Stage1 和 Stage2 两个阶段, 如图 7 所示。

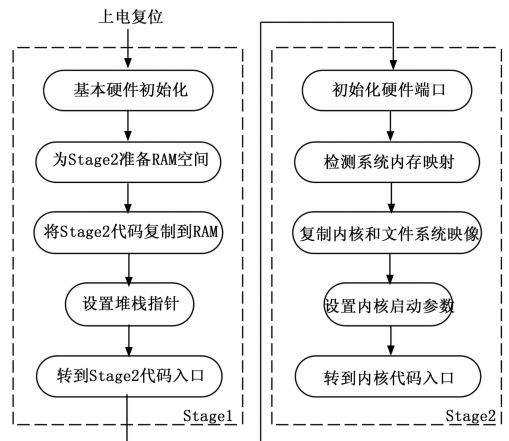


图 7 ARM 启动过程

S3C2410 处理器针对 Linux 可配套使用的 BootLoader 主要为 vivi 及其各个功能增强版。为测试任务部署和方便后期开发, 系统选择了具备外接 SD 卡自动升级功能的 vivi 版本, 根据核心板引接跳线情况, 设置了根据跳线连接状

态自动升级系统的选项，经过编译后使用 JTAG 线缆烧录到了核心板中。

2) Linux 的移植：

Linux 移植主要包括内核版本的确定，内核编译环境的搭建，内核与驱动的裁剪，Ram Disk 的制作，下载测试等几个阶段。

(1) 确定内核版本。由 S3C2410 处理器决定了选用内核的最高版本为 2.6.X，根据官方手册及 Linux 内核手册建议，选择了适配性最佳的 2.4.24 版本。

(2) 搭建内核编译环境。移植前需要在宿主机上建立 ARM 的交叉编译环境，宿主机选用了 Ubuntu_10.04_LTS 版本，主要用到的开发工具包括 3 个部分：binutils、gcc、glibc。其中，binutils 是二进制文件的处理工具；gcc 是编译工具；glibc 是链接和运行库。所有需要用到的工具均使用处理器手册建议官方二进制版本：binutils-2.11.2，gcc-2.95.3 和 glibc-2.2.3^[11]。

(3) 裁剪内核与驱动。Linux 内核是一个模块化结构，其任何功能都可以选择静态加载、动态加载或不加载的方式，进而来控制内核大小以适应不同系统运行环境。在 S3C2410 核心板中由于硬件环境已经确定，且系统资源有限，使用了 menuconfig 工具对内核进行深度裁剪与定制。

(4) 制作 Ram Disk。Ram Disk 实际上是把系统内存划出一部分当作存储器使用。对于操作系统来讲内存的存取速度远远大于 Flash，所以嵌入式系统中根据实际情况需要把常用应用程序都安装在 Ram Disk 的驱动器中，然后用内存的速度运行它。

ARM Linux 采用 Ram Disk 的方式来装载根文件系统，所有在运行内核之前，需要先制作 Ram Disk，将必须的文件和设备加入到 Ram Disk 中，当内核启动后，会从指定地址去读取根文件系统。

(5) 下载测试。将制作完成的内核和 Ram Disk 文件存入 SD 卡通过 BootLoader 的自动升级功能下载到核心板即可运行。

3.2 数据分析处理及故障诊断软件

数据分析处理及故障诊断软件基于嵌入式 Linux 操作系统，使用 C++ 语言在跨平台集成开发环境 QT Creator 上完成设计开发。使该软件具有良好的跨平台工作能力和人机交互界面，可方便的进行测试数据查询和关键参数烧录，并且占用极少的系统硬件资源^[12]，保证了主体测试任务的顺利开展，软件主要界面截图如图 8 所示。

数据分析处理及故障诊断软件按功能划分主要由电源检测分系统和参数烧录分系统组成。其中电源监测分系统主要包含测试任务规划模块、数据采集模块、数据处理模块。参数烧录分系统主要包含地址测试模块、KB 值测试模块、保护点测试模块。最终由综合故障诊断模块结合集成的维修经验对被测电源的故障诊断结果。该软件设计框图如图 9 所示。



(a) 电源检测界面截图



(b) 参数烧录界面截图

图 8 软件界面截图展示

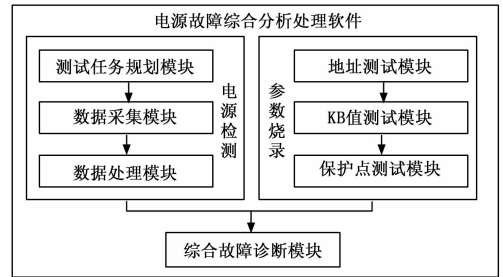


图 9 软件系统设计框图

4 实验结果与分析

雷达接收系统中，需要低噪声放大器放大微弱的目标反射回波信号以提升信噪比，进而完成后续的处理。而为低噪放提供低纹波 4.6 V 直流电源的质量将直接影响雷达目标检测的性能。经过实际测试可知，本系统对低纹波电源的实测数据相比直接测试可获得较高的准确度。

如图 10 所示为对正常的低纹波 4.6 V 直流电源在没有滤波处理和有滤波处理下，连续采集 200 组数据结果对比曲线。由图 10 可知，经过滤波处理的采集电源数据，可准确反映电源的工况，不会产生野值，为电源状态分析和故障定位提供了准确的数据支撑。

5 结束语

本文设计的某型雷达便携式电源检测维修系统将电源参数测试硬件电路与基于 ARM 的嵌入式 Linux 操作系统相结合，综合了某型雷达多种电源的测试经验和故障判别方法，通过良好的人机交互软件，完成了多种电源的现场快速测量、故障诊断定位和参数在线修改烧录，解决了装备

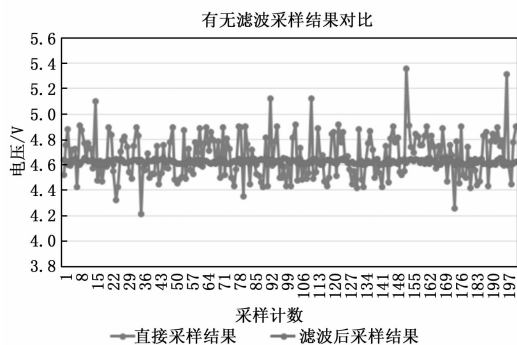


图 10 低纹波 4.6 V 电源在有滤波与无滤波下结果对比

现场检测维修不便的难题, 提高了装备的自主维护维修能力和维修效率, 该系统至今已在某大型地基相控阵雷达装备阵地得到应用。系统在使用过程中, 设备软件运行稳定, 测量结果准确, 缩短了维修时间, 提高了维修效率, 达到了预期效益, 对同类大型雷达装备的电源类器件的测试和维修工作提供了重要的经验借鉴和方式方法。

参考文献:

[1] 强明辉, 丁磊, 骆国兴. 雷达电源保护电路设计 [J]. 现代电子技术, 2013 (10): 176-178.
 [2] 胡文婷. 大功率电源测试系统设计与实现 [J]. 电子世界, 2018 (9): 185-187.

(上接第 130 页)

道作为传输媒介, 极大地提升了数据传输速率, 降低了信号阻抗与损耗, 采用中间节点预测技术, 以数据作为判定依据, 通过实验证明了设计系统的控制精度较高, 控制耗时较短, 具有一定的有效性。

参考文献:

[1] 黄婷婷, 谭博. 基于 BSS 方法的卫星信号高精度快速捕获 [J]. 光通信研究, 2020 (3): 19-22.
 [2] 王雨琦, 陈特, 周钠. 基于中间节点预测的卫星光交换网络信令设计 [J]. 光通信技术, 2019, 43 (12): 16-20.
 [3] 段广仁, 王建宇, 赵天一, 等. 卫星光通信精确跟踪控制系统的参数化综合优化设计 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (3): 469-480.
 [4] 张杨, 吴文海, 胡云安, 等. 舰载无人机着舰轨迹跟踪鲁棒控制器设计 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35 (4): 557-565.
 [5] 董明估, 林宝军, 刘迎春, 等. 约束条件下导航卫星激光星间链路可视性算法 [J]. 光通信技术, 2018, 42 (5): 54-58.
 [6] 杨文忠, 夏扬波, 张振宇, 等. 移动传感网节点位置预测方法研究 [J]. 现代电子技术, 2020, 43 (2): 168-173.
 [7] 马友, 贾树泽, 赵现纲, 等. 基于张量分解的卫星遥测缺失数据预测算法 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42 (2): 403-409.

[3] 徐江燕, 李志华, 徐江飞, 等. 基于故障树的专家系统在雷达电源故障诊断中的应用 [J]. 计算机与现代化, 2012 (4): 212-214.
 [4] 阳胜波, 谢嘉威, 宋文生. 一种基于 FPGA 的 SPI 拓展应用 [J]. 电子产品世界, 2019 (5): 65-68.
 [5] 孙耀奇, 高火涛, 熊超, 等. 基于 Matlab 和 FPGA 的 FIR 数字滤波器设计及实现 [J]. 现代电子技术, 2008 (11): 97-100.
 [6] Hawley R A, Wong B C, Lin T J, et al. Design techniques for silicon compiler implementations of high-speed FIR digital filters [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 1996, 31 (5): 656-667.
 [7] 王照钢, 陈诚, 任俊彦, 等. 一种低电压高精度 125 MHz 采样/保持电路 [J]. 微电子学, 2004, 34 (3): 306-309.
 [8] 王经纬, 冯全源. 一种用于原边反馈反激变换器的电压采样电路 [J]. 微电子学, 2015 (5): 3-5.
 [9] 周文胜. 采用最新失调误差修整技术的 DigiTrim 精密放大器 [J]. 电子产品世界, 2002 (20): 77-79.
 [10] 王淑贞, 姚铭, 周洁华. U-Boot 在 S3C2410 上的移植 [J]. 网络新媒体技术, 2008, 29 (4): 95-99.
 [11] 赵敏, 杨恢先, 汤安平. 基于 S3C2440 的嵌入式 Linux 系统移植的研究与实现 [J]. 电子器件, 2008 (6): 1947-1950.
 [12] 陈鲲, 陈云秋, 刘信新. 基于 Qt/Embedded 的嵌入式 Linux 应用程序设计 [J]. 计算机与数字工程, 2009, 37 (1): 156-158.
 [8] 苏瑞恒, 庞芳河, 陈静. 铸造基台在改变种植修复角度的应用 [J]. 饮食保健, 2018, 29 (5): 32.
 [9] 袁兆炳, 艾勇, 单欣, 等. 激光通信 APT 远程控制系统 [J]. 光通信技术, 2018, 42 (11): 41-44.
 [10] 匡文龙, 沈文龙, 姬长英, 等. 农用履带机器人轨迹跟踪控制系统设计与试验 [J]. 东北农业大学学报, 2020, 51 (4): 78-87.
 [11] 王春阳, 姜明瑞, 史红伟. 四旋翼无人机轨迹跟踪控制系统设计 [J]. 电光与控制, 2019, 26 (3): 103-107.
 [12] 赵德超, 彭力, 王皓. 非完整机器人目标跟踪控制器的设计与实现 [J]. 计算机工程, 2019, 45 (1): 297-302.
 [13] 汪志兵, 韩文民, 孙竹梅, 等. 基于网络拓扑结构与节点属性特征融合的科研合作预测研究 [J]. 情报理论与实践, 2019, 42 (8): 116-120.
 [14] 康国栋, 薛超, 李琳琳, 等. 一种基于软件无线电的卫星跟踪平台设计 [J]. 电子技术应用, 2019, 45 (2): 50-52.
 [15] 陈德毅, 柳万胜, 贺东, 等. 三轴光电跟踪系统空间目标捕获方法设计 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47 (12): 188-193.
 [16] 梁娟, 史文华, 杜朝. 基于卫星通信和无人船的海洋监测技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019 (8): 12-15.
 [17] 杨瀚驰, 高旭东. 基于北斗卫星的 BGAN 应急指挥监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 80-84.