

卫星地面电缆便携式测试系统设计

庄会慧, 杨志, 戴润峰, 赵川, 张桂英

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 为了满足卫星地面测试电缆和大型试验场地电缆的现场测试需求, 研制了一种便携式、小型化、自动化的电缆测试系统; 该系统采用嵌入式计算机技术、功能电路模块化设计以及良好的人机交互界面; 结合不同的配套转接电缆, 经实际应用, 系统可实现最大 100 芯卫星地面测试电缆的导通测试和绝缘测试; 文中阐述了系统的组成、工作原理、硬件、软件实现方法以及实物运行结果; 系统采用内电和外电两种供电方式, 便于携带, 适应各种测试环境和试验场地, 测试操作简单, 测试速度快, 效率高, 大大减少人力成本和设备成本。

关键词: 电缆; 便携式; 测试系统; 导通测试; 绝缘测试

Design of Portable Testing System for Satellite Ground Cable

Zhuang Huihui, Yang Zhi, Dai Jianfeng, Zhao Chuan, Zhang Guiying

(DFH Satellite CO, Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: A portable, miniaturized and automated cables test system is developed to meet the field test requirements of satellite ground test cable and large-scale test sites cable. The system uses embedded computer technology, modular design of functional circuits, and a good human-machine interaction interface. Combined with different supporting transfer cables, the system can realize the access test and insulation test of the largest 100-core satellite ground test cables by practical application. This paper describes the composition of system, working principle, implementation methods of hardware and software and the results of physical operation. The system uses two internal and external power supply modes, which is easy to carry and adapt to various test environments and test sites. The test operation is simple, the test speed is fast, the efficiency is large, and the labor cost and equipment cost are greatly reduced.

Keywords: cable; portable testing system; access test; insulation test

0 引言

随着卫星型号的日益增多, 卫星所用电缆数量也日益增加, 测试电缆的安全可靠, 直接影响到整个卫星的安全。现有的机柜式电缆测试设备, 体积庞大, 不便于携带和移动, 满足不了电缆现场测试需求, 尤其在大型试验和发射场地, 目前都是通过人工手动测试电缆, 电缆导通特性采用的是万用表逐点测试方式^[1], 绝缘泄露特性测试采用的转接盒与兆欧表配合的方式测试。导通绝缘测量方式均为手工测试记录, 需要多人配合完成测试, 人工记录测试数据, 测试时间长, 工作效率低, 测试极其不方便, 费时费力^[2-3]。

为提高测试效率与测试质量, 减轻人工测试压力, 研制了一套卫星地面电缆便携式测试系统, 实现卫星地面测试电缆的快速自动化测试, 包括电缆导通测试、电缆绝缘测试。测试设备体积小, 重量轻, 便于携带, 实现电缆快速自动测试, 加快测试速度, 缩短测试流程, 提高测试可靠性和精度, 快速生成测试报表, 便于质量分析和有效完善质量管理闭环, 极大缩短卫星大型试验测试前的准备时

间, 保障卫星测试按预定计划顺利进行和整星的供电安全。

1 系统技术指标

1) 计算机平台:

- a) CPU 主频: 2.0 GHz 双核 CPU;
- b) 内存: 4 GB DDR3;
- c) 硬盘容量: 500 G 固态硬盘;
- d) 外设接口: 2 路 USB 接口;

2) 输入电源:

- a) 锂电池供电: 电压 DC+12 V, 连续工作时间大于 2 小时;
- b) 外部供电: AC220±22 V / 50 Hz±2.5 Hz, 连接电源适配器进行供电。

3) 导通电阻测量指标:

电阻档: 20 Ω、200 Ω、2 kΩ、20 kΩ、200 kΩ 共 5 个量程, 精度 0.1%

4) 绝缘电阻测量指标: 测试电压直流 250 V; 测量范围为 0~300 MΩ, 精度 5%。

5) 测量通道: 100 路, 可实现被测电缆任意两点之间导通电阻和绝缘电阻的测量。

6) 正常工作条件: 温度 -15~+50 °C, 湿度 10%~90%。

7) 装置存储条件: 温度 -20~+60 °C, 湿度 10%

收稿日期: 2020-04-05; 修回日期: 2020-05-20。

作者简介: 庄会慧(1985-), 男, 山东临沂人, 工程师, 硕士, 主要从事小卫星研制和卫星综合测试方向的研究。

~95%。

- 8) 外形尺寸: 310 mm × 250 mm × 150 mm。
- 9) 整机重量: 小于 5 kg, 重量轻, 具备便携式特性。

2 系统组成及原理

2.1 系统组成

便携式电缆测试系统具有小型化和便携性的特点, 体积和重量有严格的限制, 不像大型自动测试系统那样采用机柜、便携箱或者移动方舱来组装。卫星地面电缆便携式测试系统整体是一个便携式平板电脑, 主要组成包括系统主板控制器、各主要功能电路模块、内部电池组、电源适配器、人机接口单元、对外测试接口、配套转接电缆以及测试软件等, 测试系统组成图如图 1 所示。

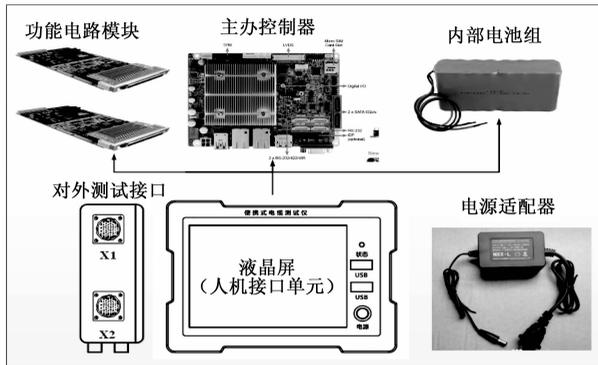


图 1 测试系统组成图

2.2 系统工作原理

测试系统以主板控制器为控制核心, 控制各功能模块电路, 实现电缆的导通和绝缘测试。测试系统在结构上采用便携式一体化设计, 使系统的集成度更高, 使用操作更简单方便。测试系统有两种供电方式: 内部蓄电池供电和外部交流 220 V 供电, 测试系统原理框图如图 2 所示。

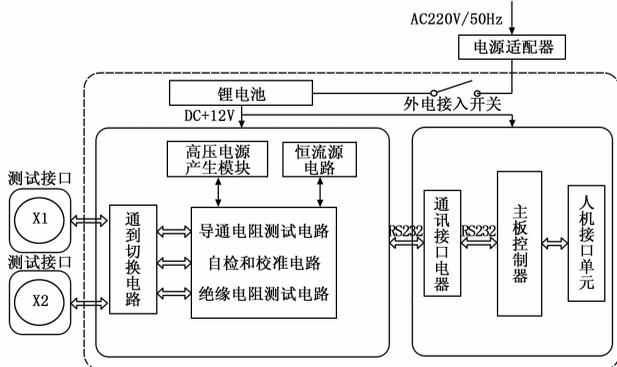


图 2 测试系统原理框图

- 1) 主板控制器完成系统测试软件的运行控制, 通过串口 RS232 对各功能模块电路进行通讯, 控制功能电路并接收相应的数据, 进行人机接口命令交互。
- 2) 人机接口单元负责接收操作者的测试要求, 显示测试执行过程及测试结果, 并将测试信息和结果显示及打印,

该接口单元与主板控制器连接, 实现相互通讯。

3) 内部直流电源 (锂电池) 提供整个电路系统的工作电源, 为高压电源产生模块提供输入、提供恒流源电源以及其它功能电路模块所需电源。

4) 高压电源产生电路产生 250 V 直流电压, 为绝缘电阻测试电路提供测试所需高压。

5) 恒流源电路提供导通电阻测试所需的恒定电流源, 流经被测电缆。

6) 通道切换电路由继电器矩阵开关阵列组成, 接收来自主板控制器的测试指令, 将需要测试的被测点分别切换到对应的公共测试通道上。

7) 导通电阻测试电路、绝缘电阻测试电路、自检和校准电路、通讯接口电路主要由 ARM 为核心器件构成的专用模块电路, 分别实现导通电阻测试、绝缘电阻测试、以及与上位机通讯接口功能。

8) 自检和校准电路实现系统定期自检和校准, 保证系统运行的安全性、准确性和可靠性。

3 硬件设计

3.1 高压电源产生电路

高压电源产生电路通过上位机的测试命令控制固态继电器 (MPDCD3) 的吸合, 将高压电源产生电路的供电电压接通, 不需要绝缘电阻测试时固态继电器断开, 系统高压电源没有输出, 保证了测试安全性。选用定制的隔离型 DC-DC 电源模块 (WRH12250S-8) 产生绝缘电阻测试的高压电源, 该电源具有功率密度大, 输出精度高等特点, 电路原理图如图 3 所示。

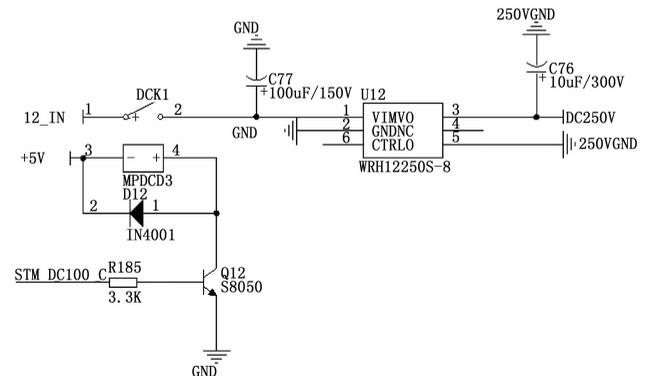


图 3 高压电源产生电路图

该隔离电源模块技术特点: 效率高达 80%, 宽输入电压范围 (2: 1), 高低温特性好, 过流保护, 短路保护 (自恢复), 隔离电压 1 500 VDC, 工作温度: $-40 \sim +85$ °C, 内部贴片化设计, 金属屏蔽封装, MTBF > 1 000 000 小时等。

3.2 通道切换电路

通道切换电路采用继电器阵列式设计^[4-5], 被测电缆和测试系统形成闭合回路, 利用继电器开关矩阵, 可实现被测回路任意两点之间的通路和断路切换测量。通道切换电

路功能框图如图 4。

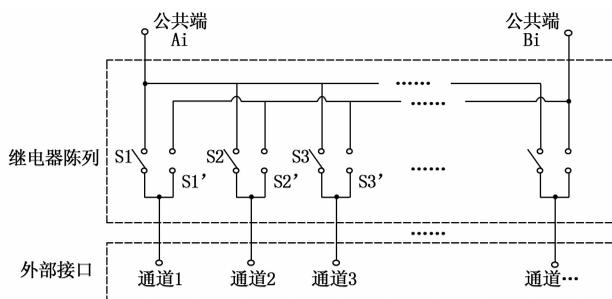


图 4 通道切换电路功能框图

通道切换模块由干簧继电器 (HE3621A0500) 组成, 继电器控制由 SN74HC573ADW 和 MC1413D 芯片组成的隔离驱动电路进行驱动控制, N74HC573ADW 用于锁存控制信号, MC1413D 芯片用于驱动继电器, 提供继电器的控制电流; 控制电路核心使用 STM32 处理器芯片, 通过进行隔离通道切换电路可以进行 100 路信号的任意两个通道切换, 构成了 100×2 矩阵开关。

1) HE3621A0500 微型单直插式簧片继电器:

该直插式簧片继电器可切换 300 V 直流电源 (10 W 时)。由 SIL 封装制成且包括 A 形 (单刀单掷常开) 触点。提供带二极管抑制线圈, 具有标准 5 V 线圈, 具有 5 V 二极管抑制线圈; 工作温度范围: $-40 \sim +85$ °C, 触点电阻 150 mΩ。

2) SN74HC573ADW 8D 锁存器:

SN74HC573ADW 为八个锁存器都是透明的 D 型锁存器, 当使能 (G) 为高时, Q 输出将随数据 (D) 输入而变。当使能为低时, 输出将锁存在已建立的数据电平上。输出控制不影响锁存器的内部工作, 即老数据可以保持, 甚至当输出被关闭时, 新的数据也可以置入。这种电路可以驱动大电容或低阻抗负载, 可以直接与系统总线接口并驱动总线, 而不需要外接口。特别适用于缓冲寄存器, I/O 通道, 双向总线驱动器和寄存器。

3) MC1413D 8D 锁存器:

MC1413 是由七个硅 NPN 达林顿管组成, MC1413 的每一对达林顿管都串联一个 2.7 K 的基极电阻, 在 5 V 的工作电压下它能与 TTL 和 CMOS 电路直接相连, 可以直接处理原先需要标准逻辑缓冲器来处理的数据。MC1413 工作电压高, 工作电流大, 灌电流可以达到 500 mA, 并且能够在关态时承受 50 V 的电压, 输出还可以在高压负载电流并行运行。

3.3 恒流源电路

恒流源电路用于导通电阻测试, 提供整个测试通道电流, 该系统选用的测试电流为 5 mA; 电路主要由 TL431 精密稳压芯片和 N 沟道增强型场效应管以及外围电路构成。

用 N 沟道增强型场效应管场效应管的漏极电流与源极电流绝对相等, 这就大大的减小了负载对恒流源的影响; TL431 的输入端由稳压芯片提供 5 V 输入, 这样就保证了

在电源电压变化的情况下, TL431 的输入电压与场效应管的 VGS 不变, 保证了恒流源输出的精度, 根据测试需要恒流源输出电流为 5 mA。

3.4 导通电阻测试电路

测试系统导通电阻测试, 采用四线测量法, 此方法可以补偿导线电阻, 使得测量电阻精度更高^[6]。恒定电流通过电流源切换开关以及继电器矩阵开关后流经被测电缆电阻 R, 测试电流为 I, 被测电缆上产生压降为 U, 通道测量开关闭合后将产生的压降经过放大后送入 AD 采集芯片, 完成被测电缆阻值 R 的测试, 根据欧姆定律可得:

因此导通电阻:

$$R = U/I \quad (1)$$

四线电阻测量原理框图如图 5 所示。

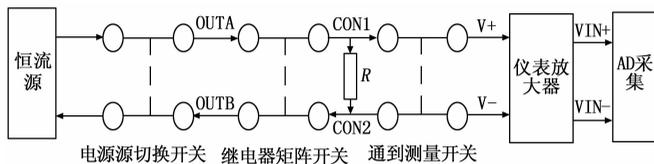


图 5 四线电阻测量原理

四线电阻测量法是由供给额定电流的电流源端口 (两线), 和检测电压降的电压采集端口所构成的 (两线)。连接于被测电缆电阻的电压采集端口的测试线, 因为电压采集端仪表放大器的输入电阻很大, 基本上没有电流流过, 所以不受测试线电阻以及接触电阻等影响, 可达到精确测量。

采集端输入端由 OP497GS 组成的初级放大和电压跟随电路对采集电压进行第一级放大, 然后通过仪表放大器 INA128U 进行第二级放大, 放大后的输出通过 ARM 芯片内部 12 位 AD 进行采集。

3.5 绝缘电阻测试电路

测试系统的绝缘电阻测试方法采用分压法进行对绝缘电阻的测试^[7]。通过测量标准采样电阻上的分压电压来计算绝缘电阻值, 精密仪表放大器对前端输入信号进行电压放大, 后端设有分压和保护电路, 防止损坏后级采样 AD, 测试采集选用 ARM 内部自带的 AD 进行采集^[8]。标准采样电阻分为 20 k、100 k、250 k 和 500 k 四个档位, 测试过程中自主切换, 可实现最大 300 M 绝缘电阻的测量, 测试完成, 高压电源继电器自动断开, 绝缘电阻测试原理框图如图 6 所示。

图 6 中, R_1 和 R_2 为限流电阻, R_3 为已知的标准采样电阻, R 为待测绝缘电阻, U_1 为高压电源电路产生的高压, U_2 为 AD 采集电路经放大器采集的分压值, 根据全电路欧姆定律可知:

$$U_2 = \frac{U_1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2)$$

因此得绝缘电阻:

$$R = \frac{U_1}{U_2} \times R_3 - (R_1 + R_2) \quad (3)$$

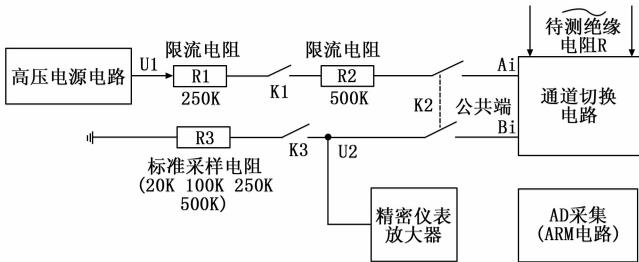


图 6 绝缘电阻测试原理框图

被测电缆不同线芯之间的绝缘电阻值，通过由主板控制器和逻辑控制单元控制的矩阵开关单元，将被测点各个通道切换到绝缘电阻测试电路中，测试电路完成测试后，并将测试结果值通过总线上传，最后通过人机交互单元界面显示出来。

3.6 通讯接口电路

通讯接口电路在整个系统中至关重要，起到上传下达的作用。RS232 通讯接口利用 ARM 处理器的片上资源 (UART) 作为核心，结合 SP3232 芯片作为接口电平转换芯片，实现测试系统所有模块控制电路与主板控制器的总线通讯，下传主板控制器通讯控制指令，同时将导通和绝缘测试模块的测试数据，通过总线上传回主板控制器，并通过人机接口单元显示出来。RS232 接口电路原理图如图 7 所示。

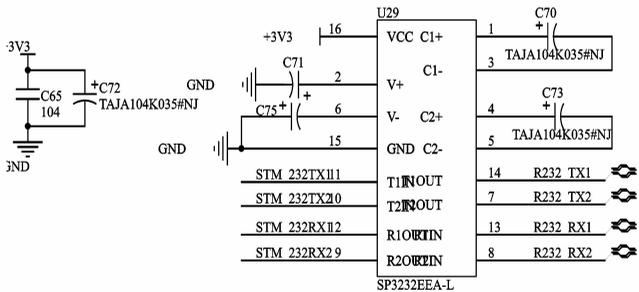


图 7 RS232 接口电路原理图

4 软件设计

电缆测试系统软件在 WINDOWS 7 操作系统，Microsoft Visual C++ 6.0 开发环境下开发，数据库选用 Excel2007, Word2007，具有良好的人机交互界面^[9]，可以方便地设置测试条件、选择测试项目等信息。测试软件采用模块化设计，主要由软件登陆界面、数据文件管理界面、系统维护界面、连接管理界面和测试项目管理界面等组成。软件登录界面设置人员操作权限，防止意外操作造成使用上的风险；数据文件管理界面完成测试报表文件的查询、保存和删除；系统维护界面完成测试系统的校准和自检；连接管理界面完成被测电缆芯数的定义及连接；测试项目管理界面，实现与功能模块的串口通讯，完成被测电缆的导通测试和绝缘测试。系统软件功能框图如图 8 所示。

软件总体工作流程为：开机打开测试软件后，在登陆

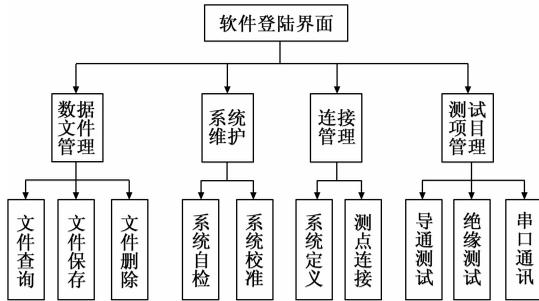


图 8 系统软件功能框图

界面输入用户名和密码，程序会对设备进行初始化。在系统维护界面，运行系统自检流程。若没有通过自检则立刻结束程序，查找原因，通过自检后在连接管理界面，进行被测电缆的芯数定义和接点定义，最后在测试项目界面对被测电缆进行导通测试和绝缘测试，测试完成系统自动生成测试报表。

5 实物运行与结果分析

卫星地面电缆便携式测试系统，目前已在卫星大型试验场地开展实际应用，在测试场地不具备 220 V 市电的情况下，系统由内部蓄电池供电，进行地面测试电缆和延长电缆的导通测试和绝缘测试。测试结果表明，系统开机测试时间超过 2 小时，仍能正常工作，系统运行稳定，测试过程单人操作就能完成测试，测试速度快，测试结果准确可靠，测试完成自动生成电子版测试报告，不再需要人工记录，极大提高工作效率，相比传统的人工测试，效率提高 80% 以上。由于卫星地面测试电缆较多，选取其中一根电缆为例，电缆连接器两端定义为 A2 和 B2，进行电缆测试，图 9 是测试软件执行界面图。

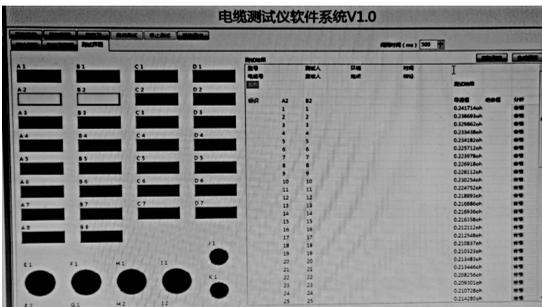


图 9 测试软件执行界面图

6 结束语

卫星地面电缆便携式测试系统，采用硬件和软件模块化设计^[10]，各功能模块相对独立，通过不同的转接电缆组合，可最大实现 100 芯电缆的导通和绝缘测试，并且测试通道具有可扩展性。供电方式灵活，采用交流 220 V 外电和内部蓄电池两种供电方式，内电方式特别适用于卫星大型试验场地和发射场等特殊环境，系统体积小、重量轻、携带方便、适应能力强，系统能够对地面电缆实现快速测试，高效准确，并生成测试报表，质量形成闭环，能够及

时检测出电缆存在的安全隐患, 为整星的安全测试提供可靠保障。

参考文献:

- [1] 苏建军, 郑永丰, 于功敬, 等. 便携式电缆测试仪的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (11): 1585-1588.
- [2] 李健. 智能型电缆测试系统的设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2010, 334 (23): 141-144
- [3] 权赫, 杨岫婷, 肖龙. 运载火箭电气系统箭上电缆网自动导通绝缘测试仪的设计 [J]. 电子测量技术, 2014, 37 (10): 37-40
- [4] 杨峰. 利用单片机实现多路矩阵切换 [J]. 机电工程技术, 2004, 4 (33): 46-48.

(上接第 18 页)

3) 对选择的测点用探笔接入检测仪, 选择合适的频段后进行检测, 截取图像;

4) 对图像进行对比分析, 查找电路板故障损坏位置。

该方法用于某型装甲车辆灭火抑爆系统板的故障诊断, 为验证该故障诊断系统的诊断能力, 对该系统各种故障状态进行了模拟, 并进行了诊断。对每种故障状态进行了 1 000 次实验, 最后达到的故障诊断效果见表 1。

表 1 某型灭火抑爆系统电路板诊断效果

故障模式 FM	故障原因	准确率 (%)
控制盒无法接收探测器信号	IC3 窗口损坏	99.1
无法完成对信号的处理	IC5/6 损坏	95.1
IC5/6 无法完成对信号的处理	集成芯片供电电路损坏	96.6
无法正常指示灭火瓶状态	灭火瓶指示灯控制故障	94.9
无法启爆电爆管喷射灭火剂	电爆管启动的驱动电路故障	95.4
无法按正确时序将 IC5 的启动信号送往 IC6	计数、震荡电路故障	97.2
IC5 无法正常开启和关闭	定时控制电路故障	95.6
无法完成平时/战时的工况转换	平战转换电路故障	97.2
系统无法完成自检	自检驱动电路故障	98.5
火情判断不准确	调节电路故障	96.2

由表中数据可知, 该故障诊断方法对灭火抑爆系统电路板的故障诊断准确率几乎达到 95% 以上, 能够实现对灭火抑爆系统电路板的故障诊断, 达到故障诊断需求。

5 结束语

本文介绍了一种基于 VIF 特性分析的电路板故障诊断方法, 首先介绍了该方法实现的硬件基础和理论基础, 针对分立的元器件, 基于 VIF 特性曲线进行了检测及分析,

- [5] 黄安康, 任秉银, 崔贤玉. 电缆自动测试系统中程控矩阵开关设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 22 (12): 4043-4045.
- [6] 张朵, 许宜申, 吴茂成, 等, 朱欣华. 基于四线测量法的智能微电阻测试仪设计 [J]. 电测与仪表, 2015, 52 (10): 29-34
- [7] 葛勇, 王军, 方诗麟. 电缆导通绝缘智能化测试设备设计 [J]. 装备制造技术, 2019, (6): 14-16.
- [8] 冯建华, 赵亮. 单片机应用系统设计与产品开发 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [9] 李颂华, 康会光. Visual C++2005 入门经典 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [10] 李萍慧, 林辉. 航空整机电缆自动测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (4): 789-791.

并分析了几种常见的元件故障模式, 并对几种故障模式进行了模拟并采集了故障曲线, 总结了基于 VIF 特性分析的元件故障规律, 为电路板的模块级检测打下基础, 积累经验。应用该方法对某型灭火抑爆系统的故障进行了检测与诊断, 根据子模块 VIF 特性的分析结果来看, 能够准确地定位故障, 提高了诊断过程中检测环节的效率, 针对电路中容性或感性的故障模式, 有着很好的诊断效果。但在诊断环节还需要借助电路的原理, 在后续研究中可以结合神经网络等方法往智能化转变, 还需要进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 高昕. 基于幅相特征的模拟电路故障诊断与可测性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [2] 裴杰才, 李志华, 丁伟聪. 基于混合核函数 PSO-SVM 的模拟电路故障诊断 [J]. 计算机与现代化, 2017 (1): 41-45.
- [3] 吴世浩, 孟亚峰. 非线性模拟电路故障诊断方法综述 [J]. 飞航导弹, 2017 (9): 60-64.
- [4] 俞建峰, 陈翔, 杨雪琪. 我国集成电路测试技术现状及发展策略 [J]. 中国测试, 2009, 35 (3): 1-5.
- [5] 牛海斌. 基于 VI 曲线的在线测试的研究与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [6] Wang T, Zhang H, Zhang H. Integrated failure model for analog circuit simulation based on Saber platform [A]. International Conference on Consumer Electronics [C]. 2014.
- [7] 朱大奇. 电子设备故障诊断原理与实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [8] 恩云飞, 罗宏伟, 来萍. 电子元器件失效分析及技术发展 [J]. 失效分析与预防, 2006, 1 (1): 40-42.
- [9] 何江科, 张万里, 于致轩. 探讨常见电子元器件检测方法 with 经验 [J]. 电子制作, 2013 (9x): 21-21.
- [10] Abdi H, Williams L J. Principal component analysis [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews
- [11] Chang, Herbert Y. A method for digitally simulating shorted input diode failure [J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 48 (6): 1957-1966. Computational Statistics, 2010, 2 (4): 433-459.