

doi: 10.7690/bgzdh.2018.05.010

多芯线缆故障分析与快速诊断技术

瞿生鹏, 陈机林, 侯远龙, 陈宇政, 胡继辉
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为解决现有多芯线缆故障诊断系统存在的操作困难、效率低等问题, 设计一种线缆故障快速诊断系统。采用故障树分析法对多芯线缆进行定性分析, 再结合 FMECA 分析法对故障树顶事件进行评估与预测。系统中硬件控制平台采用 STM32+CPLD 体系结构, 通过 visual C++ 编译人机交互界面, 结合控制模块化思想进行设计, 并进行实验验证。实验结果表明: 该系统能快速、准确地检测待测线缆, 具有工作稳定可靠、操作方便和效率高的特点。

关键词: 故障诊断; 故障树分析; FMECA; STM32; CPLD
中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Multi-core Cable Fault Analysis and Quick Diagnosis Technology

Qu Shengpeng, Chen Jilin, Hou Yuanlong, Chen Yuzheng, Hu Jihui
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the problems of existing multi-core cable fault diagnosis system, such as difficulty in operation and low efficiency, design cable fault analysis and quick diagnosis system. The fault tree analysis was used to qualitatively analyze the multi-core cable, and then combined with FMECA to evaluate and predict fault tree bottom events. According to the fault analysis results, a fast fault diagnosis system of cable fault was designed in this paper. The hardware control platform in the system adopts STM32 + CPLD architecture, used visual C++ to compile the human-computer interaction interface, and design with the thought of control modular. Verify the technology with the test. The test results show that the system can quickly and correctly detect cable, and it has a stable and reliable work, easy operation, high efficiency.

Keywords: fault diagnosis; fault tree analysis; FMECA; STM32; CPLD

0 引言

随着大型武器装备自动化程度的提高, 其使用的线缆也逐渐增多。为确保大型武器装备正常工作, 线缆故障诊断变得十分重要。在国防领域, 时间的宝贵性往往以生命代价作为标尺, 快速诊断出有故障的线缆成为重要研究目标^[1]。目前国内企业多数采用万用表对待测线缆进行人工检测, 工作量较大且效率较低^[2]。为解决线缆故障快速诊断问题, 笔者采用故障树(fault tree analysis, FTA)+FMECA 分析法对线缆潜在故障进行分析与预测。根据分析结果, 笔者采用单片机 STM32 作为控制核心, 设计了一种线缆故障快速诊断系统。考虑到单片机 STM32 的 I/O 口数目较少的问题, 笔者采用 2 块 CPLD 芯片来扩展 STM32 的 I/O 口: 一块 CPLD 作为信号源; 另一块 CPLD 用来采集信号, 实现快速诊断线缆短路、断路以及错接的问题。

1 基于 FTA+FMECA 的线缆故障分析







多芯线缆作为大型武器装备的重要组成部分, 主要用于短距离内输送电能以及传递控制信号, 其作用直接影响到大型武器装备的正常工作。笔者通

过采用 FTA+FMECA 分析法对多芯线缆故障进行分析, 对潜在故障进行评估、预测, 对故障诊断提供科学依据。

1.1 线缆故障的故障树分析

故障树的树形图用来展示潜在故障与造成故障原因之间的逻辑关系, 通过分析可能发生故障的原因, 为提高系统可靠性提供科学依据^[3]。故障树常用的符号如表 1 所示。

表 1 故障树常用符号

分类	符号	名称
事件符号		矩形符号(顶事件, 中间事件)
		圆形符号(底事件)
		菱形符号(未展开事件)
逻辑门符号		或门符号
		与门符号
转移符号		三角形符号(入三角, 出三角)

线缆故障是由多因素引起的, 如机械损伤、过电压、过热、绝缘老化和产品质量缺陷等^[3], 笔者按照故障原因与故障模式的因果关系建立线缆故

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-03-26
作者简介: 瞿生鹏(1993—), 男, 江苏人, 硕士, 从事伺服智能控制研究。

障树模型^[4]。

选择线缆故障作为故障树的顶事件，将线缆产生故障的主要原因归纳为机械损伤、过电压、产品质量缺陷、过热和绝缘老化^[3]。图 1 为线缆故障树

模型，以线缆故障作为该故障树的顶事件；图 2 为线缆质量缺陷故障模型，以线缆质量缺陷作为该故障树的顶事件；图 3 为线缆绝缘老化故障树模型，以线缆绝缘老化作为该故障树的顶事件。

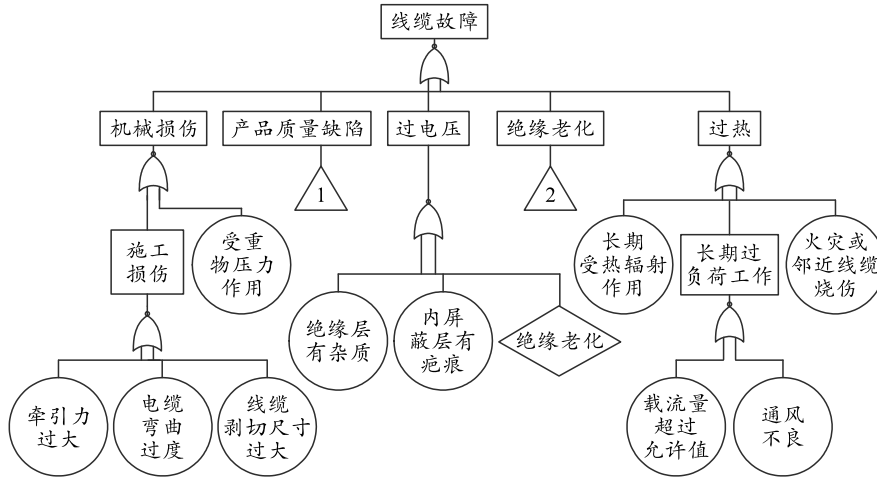


图 1 线缆故障树模型

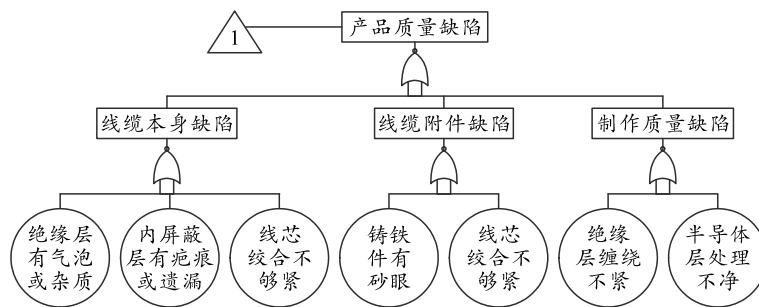


图 2 线缆质量缺陷故障树模型

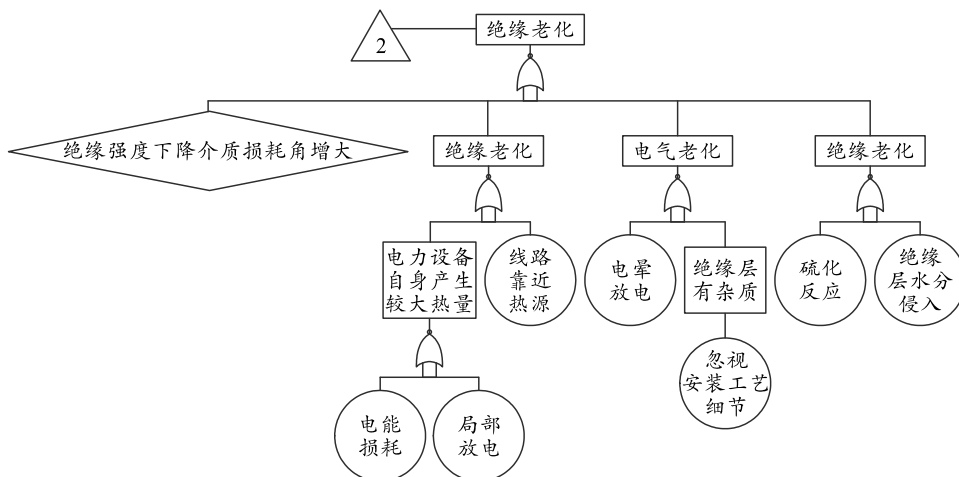


图 3 线缆绝缘老化故障树模型

经分析故障树模型得出结论：线缆故障主要由工艺与电气 2 个因素引起，另外忽视安装细节和安装人员操作不熟练也是导致线缆故障的原因；因此，为了减少故障的发生、提高线缆使用寿命，需要采取相关措施，比如提高线缆质量、加强维护工作等。

1.2 线缆故障的 FMECA 分析

FMECA 是一种用于可靠性设计的定性分析方法，主要由故障模式及影响分析(FMEA)和危害性分析(CA)2 部分组成，目的在于预防和控制故障的发生，减少设计过程中存在的缺陷，提高系统的可靠性^[5]。

危害性分析法即根据每个故障模式发生的可能性按等级划分为 A、B、C、D、E 5 个等级^[6]，5 个等级具体含义如表 2 所示。

表 2 故障模式发生概率分类

等级	定义	概率特征	故障模式发生概率
A	经常发生	高概率	占系统总故障的 20% 以上
B	有时发生	中等概率	占系统总故障的 10%~20%
C	偶尔发生	不常发生	占系统总故障的 1%~10%
D	很少发生	不大可能发生	占系统总故障的 0.1%~1%
E	极少发生	近乎为零	占系统总故障的 0.1% 以下

笔者采用 FMECA 分析法对线缆进行分析，能够比较全面地识别出设备潜在的问题或引起故障的关键部位。通过监测系统的关键部位，可总结故障的严重程度和发生的概率。

表 3 为线缆接头故障 FMECA 分析，线缆接头发生故障主要与制作工艺和运行环境有关，如牵引力过大、散热不好和接触面处理不佳等^[7]。

表 3 线缆接头故障 FMECA 分析

故障模式	故障原因	故障影响	严重程度	概率等级
线芯拉伤	牵引力过大	降低承载能力	中等	A
管壁有杂质或氧化层	接触面处理不佳	降低电气性能	严重	C
异物连接	接触面空隙大	接触电阻增大，机械性能降低	中等	B
压力不足	散热不好，耐热性能差	绝缘失效	严重	B
绝缘材料碳化				

表 4 为线缆断线故障 FMECA 分析，断线故障发生概率较低，通常由制作工艺水平不高引起的。通过对 FMECA 表格分析，危害性最大的故障模式为“绝缘材料碳化”“绝缘严重老化”“化学腐蚀”。为了提高线缆的可靠性与安全性，可从日常维护、制作工艺等方面采取措施。

表 4 线缆断线故障 FMECA 分析

故障模式	故障原因	故障影响	严重程度	概率等级
单线断裂	设备缺陷，接头未焊或脱焊	降低电缆抗拉强度，降低承载能力	严重	C
表面划伤	设备或模具不完善	降低机械性能	中等	C
化学腐蚀	酸洗后残留	降低绝缘强度，减少电缆使用寿命	严重	B
绝缘老化	酸绝缘层出现缺陷，散热不好，耐热性能差	绝缘失效	严重	C

1.3 FTA+FMECA 分析结论

通过结合故障树分析结果和 FMECA 分析结果，线缆故障在电气方面的反应大致分为相间短路、线芯断路和操作人员的芯线错接。

2 快速诊断原理

根据上述分析，线缆能够正常工作就要满足线芯不能断路以及任意 2 根线芯之间不能相间短路与错接^[8]。检测线缆的连通性是检测线缆其他特性的基础^[9]。

实际使用中的线缆芯数往往是不同的，假设待测线缆芯数为 n ，那么线缆正常工作的充分必要条件是线芯不能断路以及任意 2 根线芯之间不能相间短路与错接，换言之，给线缆任意一根芯线的一端发送测试信号后，在线缆的另一端其他芯线不应该检测到测试信号。记发送信号端称为 A 端， A_i 代表 A 端第 i 号芯线；记接收信号端称为 B 端， B_j 代表 B 端第 j 号芯线。用于大型武器装备的线缆检测不同于电力电缆的检测，其线缆长度有限，具备两端检测的条件，因此可以采用施加数字信号的方法对其进行检测。假设待测线缆的芯数为 n ，记 A 端发送的信号为 $f(x_n)$ ，且

$$f(x_n) = \sum_{i=1}^n A_i \times 2^{i-1}, n \geq 1, A_i = \begin{cases} 1, & i = n \\ 0, & i \neq n \end{cases} \quad (1)$$

记 B 端接收的信号为 $h(x_n)$ ，且

$$h(x_n) = \sum_{i=1}^n B_i \times 2^{i-1}, n \geq 1, B_i = \begin{cases} 1, & i = n \\ 0, & i \neq n \end{cases} \quad (2)$$

则线缆无故障的充要条件为：

$$f(x_n) = h(x_n), A_i = B_i = \begin{cases} 1, & i = n \\ 0, & i \neq n \end{cases} \quad (3)$$

当检测线缆 1 号芯线时，A 端发送信号 $f(x_1) = (00 \cdots 0001)B$ ，检测线缆 2 号芯线时，A 端发送的信号 $f(x_2) = (00 \cdots 0010)B$ ，以此类推。若 $f(x_1) = (00 \cdots 0001)B$ ， $h(x_1) = (00 \cdots 0001)B$ ，则表示 1 号芯线通信正常；若 $f(x_1) = (00 \cdots 0001)B$ ， $h(x_1) = (00 \cdots 0000)B$ ，则表示 1 号芯线存在断路；若 $f(x_1) = (00 \cdots 0001)B$ ， $h(x_1) = (00 \cdots 0011)B$ ，则表示 1 号芯线与 2 号芯线存在短路；若 $f(x_1) = (00 \cdots 0001)B$ ， $h(x_1) = (00 \cdots 0010)B$ ，则表示 1 号芯线与 2 号芯线存在错接。以此类推， $h(x_n)$ 中“1”与 $f(x_n)$ 中“1”所在位置对应，则表示所测芯线通信通常；若 $h(x_n)$ 中“1”的个数少于 $f(x_n)$ 中“1”的个数，则表示存在断路，且“1”所在的芯线断路；若 $h(x_n)$ 中“1”的个数多于 $f(x_n)$ 中“1”的个数，则表示存在短路，通过接收信号中“1”的位置可判断产生短路的几根芯线；若 $h(x_n)$ 与 $f(x_n)$ 中“1”的个数相等但所在位置不对应，则表示存在错接，可通过接收信号中“1”位置判断错接情况。

线缆检测结果如表 5。

表 5 线缆故障诊断结果

条件	结论
$f(x_n) = h(x_n), A_i = B_i = \begin{cases} 1, i = n \\ 0, i \neq n \end{cases}$	线缆连通性正常
$f(x_n) \neq h(x_n), \text{且 } h(x_n) \neq 0$ $A_i = B_i = B_j = 1, (i = n, 1 \leq j < i)$	线缆 i 号与 j 号芯线之间 存在短路
$f(x_n) \neq h(x_n), \text{且 } h(x_n) = 0$	第 n 号芯线断路
$f(x_n) \neq h(x_n), \text{且 } h(x_n) = 0$ $B_j = 0, A_i = B_j = 1 (i = n, 1 \leq j < i)$	线缆 i 号与 j 号芯线错接

3 基于 STM32+CPLD 的系统设计

根据上述诊断原理，笔者设计了一种线缆故障快速诊断系统。鉴于文中采用的单片机 STM32F107 的 I/O 口只有 80 个，且有部分 I/O 口与其他功能复用，考虑装置使用的广泛性，笔者采用 ALTERA 公司的 MAX7000s 系列 CPLD 芯片来扩展 STM32 的 I/O 口。

3.1 硬件设计

根据系统功能要求，笔者采用 STM32 作为控制核心，采用 2 块 CPLD 芯片来扩展 STM32 的 I/O 口：一块 CPLD 作为信号源，另一块 CPLD 作为信号接收器。待测线缆位于 2 块 CPLD 接口电路之间^[10]，系统硬件关系如图 4 所示。上位机与下位机通过串口 RS232 建立通信，并通过上位机向下位机发送指令来控制 STM32 给 CPLD1 发送“Start”和“CP”指令，CPLD1 以“CP”为触发信号将“1”进行移位并行输出；CPLD2 用来采集 CPLD1 发来的数据，并将并行数据转换成串口数据通过 SPI 传送到 STM32 进行处理；STM32 将处理后的结果传送到上位机，并由上位机显示。

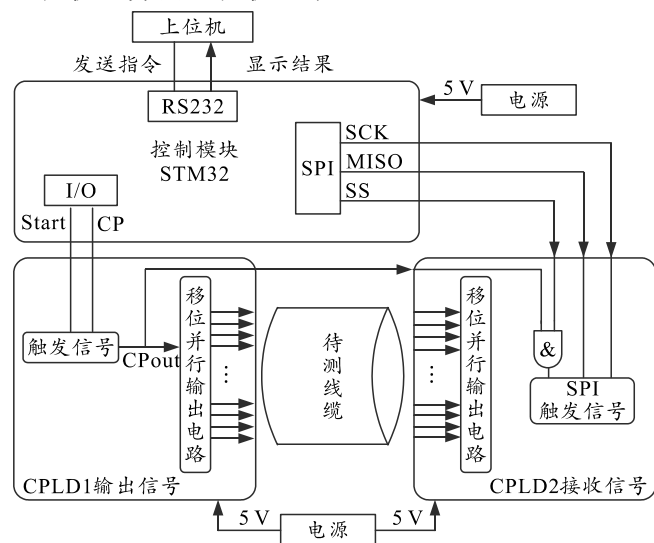


图 4 系统硬件关系

3.2 软件设计

软件设计分为下位机软件设计和上位机软件设计，上位机采用模块化思想进行编写，图 5 和图 6 分别为下位机和上位机的工作流程。在开始检测之前，先输入待测线缆号以及待测线缆芯数，点击开始按钮控制 STM32 发送“Start”和“CP”指令，使 2 块 CPLD 开始工作，CPLD2 将采集的数据放入缓存区，并将并行数据转换成串行数据通过 SPI 传送给 STM32，STM32 将处理后的数据传输给上位机，上位机将接收的数据分别与短路模块、断路模块以及错接模块的条件进行比较，如若满足则在界面显示故障类型，并显示出故障的芯线，如若都不满足则显示“OK”。

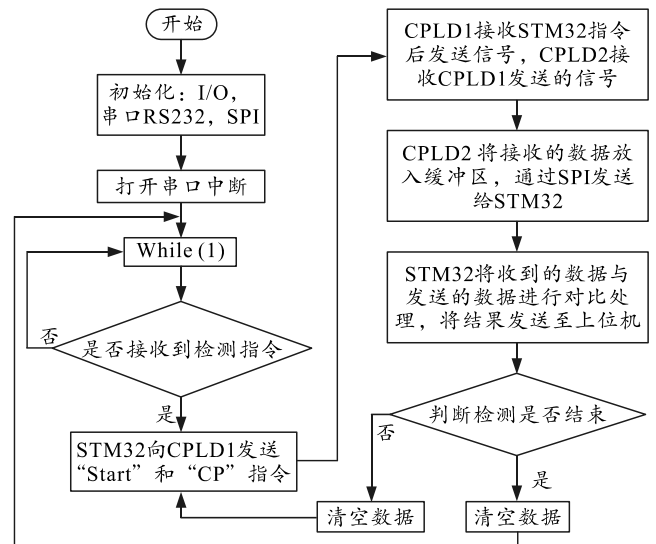


图 5 下位机工作流程

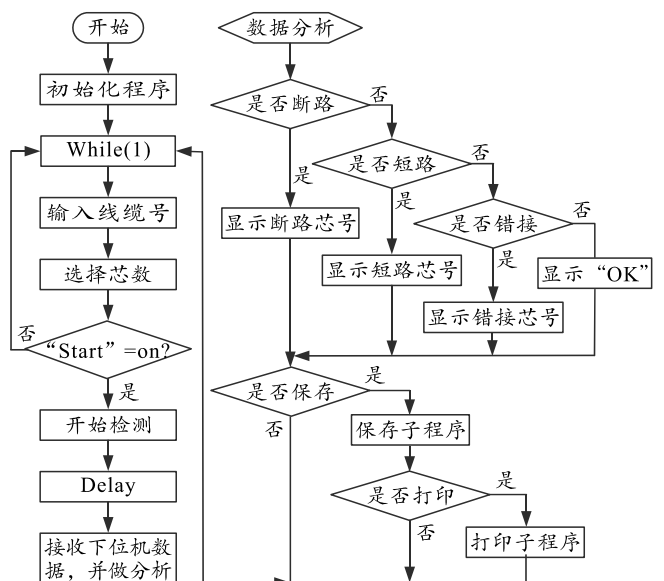


图 6 上位机工作流程

迹预测[J]. 重庆交通大学学报, 2010, 29(1): 147-150.

[5] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 134-138.

[6] 蒋诗泉, 刘思峰, 周兴才. 基于复化梯形公式的 GM(1, 1)模型背景值的优化[J]. 控制与决策, 2014, 29(12): 2221-2225.

[7] 苏永. 灰色缓冲算子与序列光滑性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.

[8] 马洪松. 基于改进灰色模型的电力负荷预测方法研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

[9] 王守相, 张娜. 基于灰色神经网络组合模型的光伏短期出力预测[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 37-41.

[10] 邓乃扬, 田英杰. 支持向量机—理论、算法与拓展[M].

北京: 科学出版社, 2009: 10-12.

[11] 陈秋妹. 数据光滑度改进与灰色关联研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2006.

[12] 李玲玲, 段超颖, 孙训俊. 灰色模型的改进及其应用[J]. 统计与决策, 2014, 38(24): 11-15.

[13] 金超, 牟燕, 马堃, 等. 灰色模型和支持向量机组合的预测模型及其应用[J]. 微型电脑应用, 2015, 31(1): 25-28.

[14] 杨春波. 基于灰色模型与人工神经网络的改进合预测模型及其应用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.

[15] 张军. 灰色预测模型的改进及其应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.

(上接第 39 页)

4 实验结果与分析

为了验证笔者设计的线缆故障快速诊断系统的有效性, 笔者制作了 2 根 10 芯线缆, 1 号线缆连通性良好, 2 号线缆的 2 号芯线断路, 4、5 号芯线错接, 7、8 号芯线短路, 其他芯线连通性正常, 2 号线缆包含了笔者研究的所有故障类型。为确保实验的准确性, 在测试之前人工先用万用表对待测线缆进行测试, 再用笔者设计的线缆快速诊断系统对待测线缆进行检测。测试结果如图 7 所示, 其正确性和人工用万用表检测一致, 并且由于采用通信方式对线缆故障进行检测, 其检测速度较快, 一组 10 芯线缆检测大概只需 3~5 s, 效率远大于人工检测。

果的功能, 减少了检测人员的工作量。根据合作单位的要求以及 CPLD 芯片 I/O 口数目限制, 该系统最多可以检测 41 芯的线缆。

5 结束语

笔者通过 FTA+FMCA 分析法对线缆潜在故障进行定性分析, 包括线缆在使用时可能发生“断路”“短路”“错接”等故障。针对分析结果, 笔者设计了基于 STM32+CPLD 的线缆故障快速诊断系统。实验结果证明: 该快速诊断系统能够快速、准确地检测待测线缆, 与传统检测方式相比, 大大提高了检测效率。

参考文献:

[1] 郭庆明. 武器电缆电参量综合测试系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.

[2] 李宏伟, 林玉池, 郑桐, 等. 新型便携式线缆快速测试技术的研究[J]. 机床与液压, 2007, 35(7): 101-102.

[3] 杨春宇. 电力电缆故障分析与诊断技术的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

[4] 鲍永胜. 电力电缆局部放电在线监测与故障诊断[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

[5] 陈颖. FMCA 技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 172-196.

[6] 夏明旗. 故障模式与影响分析技术及其应用[J]. 国防技术基础, 2010(10): 21-23.

[7] 韩琦文, 赵转萍, 梁爽. 某型导弹电缆网导通绝缘性能检测系统设计[J]. 机电工程, 2016, 33(4): 442-447.

[8] 李金洪. 电缆连通性快速检测系统设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(20): 146-148.

[9] SUN Q. Application and Improvement of Cable Inspection Technology [J]. Low Voltage Apparatus, 2010, 12(8): 65-69.

[10] 孙玉胜, 马平, 邹玉炜. CPLD 在多芯电缆测试仪中的应用[J]. 科技创新导报, 2008(6): 170-171.



图 7 检测结果

线缆连通性的传统测试方式是使用万用表进行测试, 对于 n 芯的线缆需要检测 C_n^2 次, 检测人员的工作量较大且效率较低, 而笔者设计的线缆故障快速诊断系统对于 n 芯的线缆只需要检测 n 次, 大大提高了检测效率并且能够直接显示出故障的芯线。笔者设计的快速诊断系统增加了保存、打印检测结