

星上电缆自动导通绝缘测试仪的设计与开发

魏 鹏, 李志明, 郑丽得

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 星上电缆在航天器系统工程中起到了传递能量和信息的关键作用, 并且其上天后具有不可修复性, 这就决定了它在电性能检测方面必须做到高质量与高可靠; 针对传统人工方式进行导通绝缘测试时工作强度大、检测效率低下和可信用度低等缺点, 设计并开发了一种星上电缆自动导通绝缘测试仪; 该仪器基于模块化设计的思想采用中央控制器对各个模块单元进行控制来分别实现测试通道自动切换、测试电压的供给、星上电缆导通绝缘电阻的数据采集、通讯、存储和显示; 实践结果表明, 星上电缆自动导通绝缘测试仪一方面可以提高电缆导通绝缘测试的可靠性, 增强质量控制; 另一方面, 可以提高效率, 节省生产周期, 降低劳动强度。

关键词: 星上电缆; 导通测试; 绝缘测试; 自动测试; 模块化设计

Design and Development of Automatic Cable Borne Insulation Test Instrument for Satellite

Wei Peng, Li Zhiming, Zheng Lide

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094 China)

Abstract: Satellite Cable plays a key role in the transfer of energy and information in spacecraft system engineering, and it is not repairable after liftoff, which determines that it must be of high quality and high reliability in electric performance. In view of the disadvantages of the traditional manual mode of conduction test and insulation test, such as high work intensity, low detection efficiency and low reliability, this paper designs and develops an automatic detection instrument. The instrument is based on the idea of modular design with the central controller for each module control unit to respectively realize test channel automatic switching, the test voltage supply, the star cable conduction insulation resistance data acquisition, communication, storage and display. The practice has shown that the cable automatic insulation test instrument can not only improve the reliability of the conduction and insulation test, but also enhance the quality control. On the other hand, it can improve the efficiency, save the production cycle, and reduce the labor intensity.

Keywords: Satellite Cable; Conduction Test; Insulation Test; Automatic Testing; Modular Design

0 引言

电缆常用于短距离内电能的输送和控制信号的传递, 随着自动化水平的逐步提升, 火箭、卫星等航天设备中使用的电缆日渐增多。而统计研究表明, 航天设备中有超过 20% 的系统故障是由于电缆失效引起的, 电缆发生故障已经成为影响系统整体可靠性的一个极为重要的因素。因此对航天设备的电缆进行导通绝缘测试具有非常重要的意义^[1-4]。

传统的星上电缆导通绝缘测试主要是以人工逐点测试的方式进行, 不同的测试方式需要不同的接线方式, 因此需要人工多次接线, 这种测试方式占用大量的人力和时间, 对少量的电缆测试还可以适用, 但是对于大量的电缆测试来说, 依靠传统的人工测量方法, 不仅效率低下, 检测可靠性也差, 并且极大的可能存在测试覆盖性不全的情况^[5-6]。

针对上述问题和测试工作中的实际要求, 本文设计开发了一套星上电缆自动测试装置。该装置能够自动完成电缆中被测信号的测试通道切换并具备相关的数据采集、通讯、存储和显

示功能, 可以大幅度提高电缆测试的自动化程度和工作效率。

1 星上电缆自动导通绝缘测试仪测试原理

1) 电缆的导通测试, 即测试电缆内部某两接点构成的闭合回路的导线阻值, 原理如图 1 所示。进行导通测试时, 将被测的两个接点同时接入测试通道, 形成一个闭合的回路, 然后测量该回路电压值。根据欧姆定律计算得到被测阻值, 然后根据回路阻值判断所测电缆是否导通, 如式 (1) 所示。

由欧姆定律, 满足:

$$\frac{U}{R_x + R_1 + R_2} = \frac{U_x}{R_x} \quad (1)$$

得到:

$$R_x = \frac{U_x(R_1 + R_2)}{U - U_x} \quad (2)$$

式中, U 为测试加载电压; U_x 为 R_x 的端电压; R_x 为待测电缆的阻值; R_1 为已知的标准限流电阻, R_2 为已知的标准分压电阻。

2) 电缆的绝缘测试采用了漏电流法测试, 就是将电连接器的接点接入不同的测试通道, 在测试通道间施加直流电压, 如果被测接点与另一被测接点之间绝缘, 就不会产生漏电流, 反之就会测到漏电压, 原理如图 2 所示。

收稿日期: 2017-06-09; 修回日期: 2017-07-09。

作者简介: 魏 鹏(1984-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事数字化研制、信息化管理系统等方向的研究。

根据全电路欧姆定律可知：

$$\frac{U}{R_x + R_1 + R_2} = \frac{U_2}{R_2} \quad (3)$$

得到：

$$R_x = U \frac{R_2}{U_2} - (R_1 + R_2) \quad (4)$$

式中， U 为测试加载电压； U_2 为 R_2 的端电压； R_x 为待测绝缘电缆的阻值； R_1 为已知的标准限流电阻， R_2 为已知的标准分压电阻。

在测量出分压 U_2 后，便可根据上式计算出绝缘电阻 R_x ，并将其与输入文件进行对比，进而判断线缆是否绝缘。

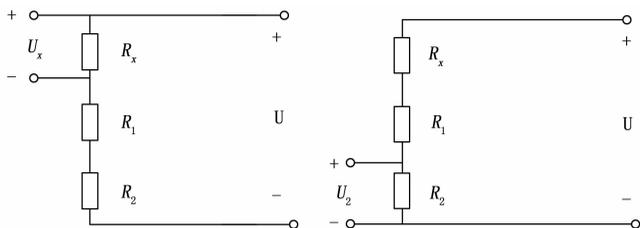


图 1 导通测试原理图

图 2 绝缘测试原理图

2 硬件设计

2.1 天上电缆自动检测系统硬件构成

相对于体积较大的通用线缆测试仪，本检测系统在硬件系统构成上向小型化，集成化发展，使之成为能灵活适应各种工况的电缆测试系统^[7-10]。天上电缆自动检测系统主要由中央控制单元、信号引入连接单元、继电器开关控制单元、测试电压产生单元、测试电路单元、数据处理单元、数据存储与显示单元和串行数据通讯单元等部分组成，其硬件构成如图 3 所示。

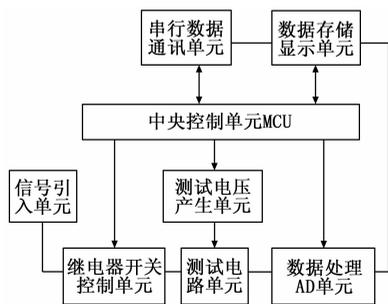


图 3 天上电缆自动测试系统组成框图

1) 中央控制单元：中央控制单元采用了 EMB3680 嵌入式工控机，EMB-3680 是一款超低功耗 3 寸工业主板，采用 AMD LX700 + CS5536 芯片组，CPU 频率是 600 MHz。配备了 512 M 的 DDR333 内存，容量最大为 1 GB。AMD LX700 内建图形控制器，支持 VGA/TFT/LVDS 显示输出，支持 4 个 USB2.0，4 个 COM 口和 2 个 10/100 Mbit/s 自适应以太网接口，提供 1 个 PC104 插槽。中央控制单元采用了串口方式来控制其他的执行模块。测试单元和输出控制单元均采用 C8051 系列单片机，通过接收中央控制单元的信号来实现对各个模块的实时控制。在系统中，根据不同的测试要求，编写相应的控制指令，存储在 DSP 程序存储器中。测试启动后，控制器执行相应的指令代码，实现对测试电压产生单元、继电器

开关控制单元等其他单元的控制，并对采集的数据进行计算处理。

2) 信号引入连接单元：该单元主要由即插件 DB-128 与接线电缆组成，即插件将被测电缆插头各插针（如 128 针插头电缆，1-128 管脚）信号全部引入继电器开关的输入端，如图 4 所示，其中每个管脚的信号分别与相应的两个继电器开关在电气上连接，如管脚 1 与开关 K1-1、K1-2 电气连接，管脚 2 与开关 K2-1、K2-2 电气连接，以这种方式将全部被测信号引入测试系统中；

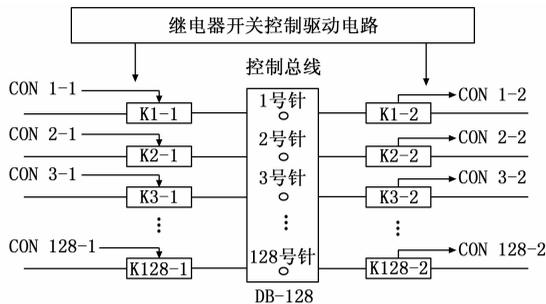


图 4 被测信号引入与开关控制设计框图

3) 继电器开关控制单元：该单元主要由继电器开关和相应的驱动控制电路组成。测量过程中，需要不断的切换被测信号的测量通道，虽然电缆上的被测信号已被引入测试系统中，但是在电气上是否被接入测量电路，由与之对应的继电器开关的通断状态决定，而继电器开关控制单元就决定着开关的通断状态，是系统设计的关键部分。仪器的中央控制单元按照测量要求，发出相应的控制指令，通过驱动电路驱动继电器控制端信号，实现对继电器开关的控制，完成开关通断状态的自动切换；

4) 测试电压产生单元和测试电路单元：测试直流高压产生电路主要由变压器升压电路、倍压整流电路、测量反馈电路等组成。工作原理是低压直流电源经过控制器产生可调脉宽和频率的方波，经过功率管斩波进入高压脉冲变压器进行升压，然后再通过倍压整流电路进行再升压和整流，在高压输出端通过分压电路进行反馈，使输出电压稳定到要求的输出电压。通过控制器可以改变 PWM 的脉宽和频率，从而实现电压的可控输出，输出用于进行导通和绝缘测试时需要的稳定直流电压，相应可产生 50 V/100 V/250 V/500 V 幅值的直流电压；

5) 数据处理单元：本单元由 AD 转换器和相应的信号处理电路组成，信号处理电路包括信号放大电路和信号分压电路，如图 5 所示。中央控制单元根据不同的测量功能和测量范围，发出相应的控制命令，驱动信号处理电路对标准电阻两端的信号进行处理，然后由 AD 采集处理后的电压信号，并将采集的数据传送给中央控制单元。采样电路通过分压电阻网络，进入量程切换电路，控制器通过采样输入的电压，根据采样电压的幅值，进行量程切换，改变放大器的放大倍数，使进入控制器的电压信号始终在 AD 采样电路的量程内。

6) 数据存储与显示单元：该单元由 EEPROM 数据存储器 and LCD 液晶显示屏组成，其中，LCD 采用 7 寸的真彩触摸屏，显示分辨率为 600×800，并配有指示灯与蜂鸣器，显示所有的测量信息，如测量通道、测量电压、测量结果阻值等，可以

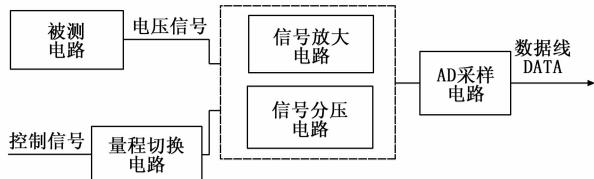


图 5 数据采集单元原理框图

很好地丰富人机交流界面, 便于测试结果的获取; 同时, 中央控制单元将处理后的测量数据通过数据线存储到 EEPROM 中, 使测试结果不丢失, 便于测试结束后对测试数据进行读取等操作;

7) 串行数据通讯单元: 该单元主要由 USB-UART 桥接电路构成, 其核心为 CP2102 高度集成元件和串口收发器 MAX223 芯片。控制系统通过该单元把测试仪器中的串行数据转换成 USB 数据格式, 上传至 PC 机, 实现测量数据的存档、备份、打印等功能, 操作简单灵活。系统以这种方式进行数据传输, 实现了基于 USB 的数据通讯, 能充分利用 USB 技术的优点, 也是目前技术发展的趋势。

2.2 主要技术指标

- 1) 10 Ω 量程电阻分辨率 0.1 Ω, 电阻测量波动小于 ± 0.1 Ω;
- 2) 100 kΩ 量程电阻分辨率 0.1 kΩ, 电阻测量值波动小于 ± 0.1 kΩ;
- 3) 200 MΩ 量程电阻分辨率 0.2 MΩ, 电阻测量值波动小于 ± 0.2 MΩ;
- 4) 测试精度优于 5%;
- 5) 导通测试开路电压 4~6 V, 最大短路电流小于 100 mA;
- 6) 绝缘测试电压范围 0~500 V, 步进 50 V, 绝缘电阻测量 10~200 MΩ, 精确度: ± (10%+5 d);
- 7) 超过设定电压 115% 时自动切断, 反应时间小于 0.5 ms;
- 8) 测试点数 128 点, 具备可扩展性;
- 9) 显示屏采用 7 寸的真彩触摸屏, 显示分辨率为 600 × 800;
- 10) 单台仪器重量不超过 5 kg (测试引入插头计算在内);
- 11) 使用充电电池持续工作时间 6 小时以上;
- 12) 工作环境温度 0~40 ℃, 相对湿度不大于 75%;
- 13) 主控板采用低功耗嵌入式工控板, CPU 为 600 MHz, 内存 512 M, 存储空间为 4 G;
- 14) 继电器开关触点寿命优于 10 万次;
- 15) 整机平均无故障时间 (MTBF) 大于 2 万小时。

3 软件设计

3.1 软件系统构成

测试软件选用 C 语言进行开发, 开发环境为 Windows XP 系统。软件设计主要包括人机接口、处理程序、数据采集接口、数据库四大部分。其中处理程序部分可将测试软件按功能划分为 5 个主要模块, 分别为: 信息采集模块、自检程序、数据采集及控制模块、数据处理模块和结论模块。软件系统构成见图 6。

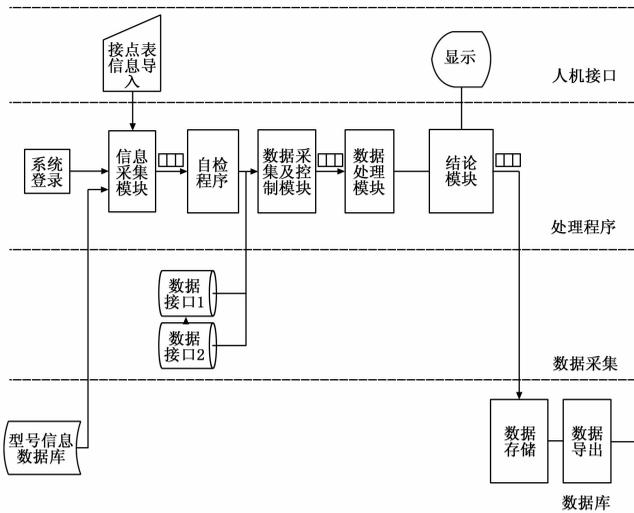


图 6 软件系统构成图

3.2 接点表导入转换程序

电缆接点表作为原始设计文件, 是依据信号传递功能设计的, 在测试时需依照电缆测试流程进行适应性转换, 其原始形态如表 1 所示。

针对电缆测试, 需对电缆编号确认, 并依照对应关系提取相应信息转换成标准测试接点表, 详细流程如下:

表 1 电缆接点表样例

始端	终端	电缆代号: W100-1		
X01Z	XXS09	属性		
J36A-9TJ	J36A-52ZK	长度/mm	电压/V	电流/mA
1,2	1,2	600	5.5	0.3
3(4,5,6),7(9)	3,4(6)	600	0	0.3
8.,	5,7	600	12	0.3

1) 判别电缆、电连接器的具体参数, 依据电缆代号、分支编号以及始端和终端的电连接器代号及型号定义到电缆网中唯一的电连接器;

2) 接点表需提取并转换的数据信息依据以下规则:

➔ “,” 表示接点分割, 前后接点之间相互绝缘;

➔ “()” 表示接点内部焊连, 括号内接点与 () 前接点之间相互导通;

➔ “.,” 表示符号前的接点连续使用两次;

通过接点信息识别与转换之后的测试接点表见表 2 所示。

表 2 测试接点表样例

W100-1					
X01Z	XXS09	X01Z	XXS09	X01Z	XXS09
1	1	2	2	/	/
3	3	7	4	/	/
4-5-6	/	7-9	/	/	4-6
8	5	8	7	/	/

3.3 自检程序

在开机后, 不插入任何电连接器的情况下, 通过点击自检按钮, 对线路转换系统中的所有接点进行导通绝缘检查, 自检工作流程图如图 7 示。

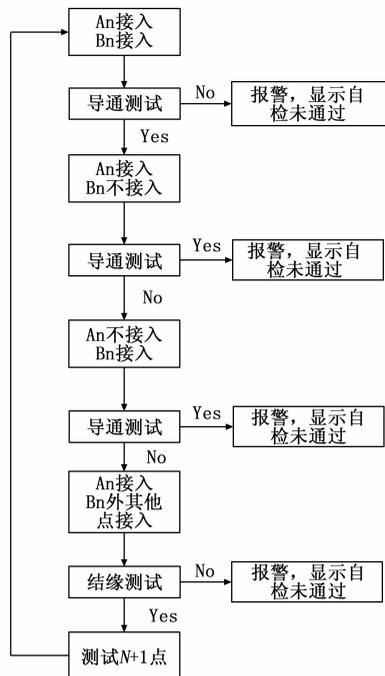


图 7 自检工作流程

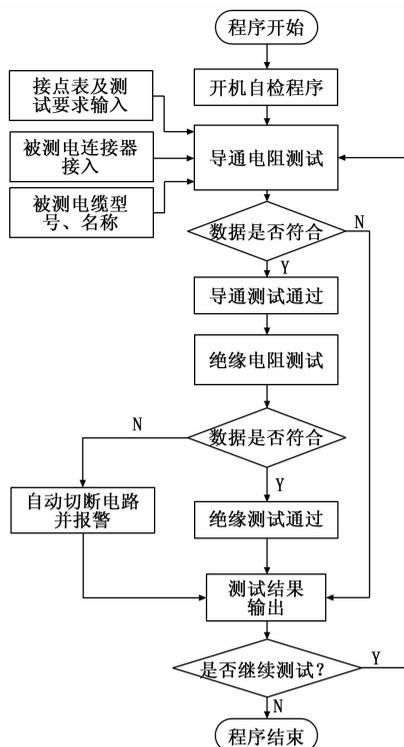


图 8 测试程序流程图

1) 导通检查方法为控制线路切换系统将测试点 N 依次同时接入、分别接入同一测试通道，测试其是否形成闭合通路，通路阻值是否符合导通判定，检查的失效模式为线路转换系统失效、断路、接触不良、短路等；

2) 在导通检查完成后，检查方法为控制线路切换系统将测试点 N 连入测试通道 A，其余所有未测试点连入测试通道 B，将 500 V 电压接入测试通道 A 与测试通道 B，检查通道间漏电流，判断各点间的绝缘关系，检查的失效模式为短路、多余物搭接等。

3) 重复导通绝缘过程，直到所有点全部进行测试。

3.4 测试主体程序

插入测试电缆后，通过运行处理程序中的数据采集及控制程序控制线路中继电器的切换进入相应测试通道，使检测系统与 被测电缆形成一个闭合回路，线路转换控制，完成任意接点间通路、断路切换测量，并通过控制数据采集卡进行数据的采集；

运行数据处理程序判定数据采集卡测得的数据是否符合测试要求，导通测试时，会对同一测点在 0.2 s 内进行 3 次测量，显示均值。当读取的数据的输入值过小或过大时，数据处理程序产生对应的处理信号，并通过软件界面反馈给操作者。

测试过程中，人机交互模式为人工选取接点表，人工发出指令，机器自动测试。测试指令分为，导通测试，绝缘测试，完全测试 3 种，通过人机界面选取。图 8 为本检测系统的完整运行流程，系统可以依照对应测试接点表进行点对点的导通绝缘测试，此外，系统还具备在出现问题时自动记录并报警的功能^[11-12]。

3.5 绝缘测试程序

绝缘测试流程是测试主体流程的重要部分，本系统通过 4 个测试阶段完成一个完整测试循环，确保数值读取准确，产品安全可靠，如图 9 所示。

1) 阶段中，程序先进行一个低电压（不大于 12 V），低电流（不大于 0.001 A）的短接检查，当确认施加电压点未连通时方进行下面阶段，保证安全性；

2) 阶段为逐渐加压过程，在 0.5 s 的升压过程中如发生击穿等现象，可以立刻切断程序并记录击穿电压及持续时间；

3) 阶段为测量阶段，达到所需电压后，程序将保持电压在此水平一段时间后（1.5 s）进行测量，以确保测量数据可靠；

4) 阶段为降压阶段，程序控制电压迅速下降，并且断开被测点。

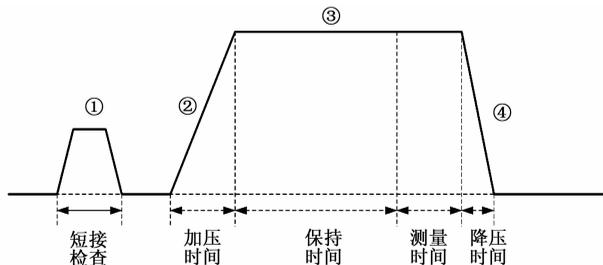


图 9 绝缘测试流程图

4 实物与应用分析

星上电缆导通绝缘自动测试系统目前已应用于遥感平台卫星低频电缆导通绝缘测试，并在测试过程中自主研发了单根电缆手动测试箱。应用此设备对某遥感平台卫星低频电缆进行导通绝缘测试，经过导通绝缘测试之后，测试系统将实测数据填入对应测试结果矩阵表格相应位置，并通过理论关系进行判断。判断标准为导通阻值小于 10 Ω ，绝缘阻值大于 500 M Ω ，对不符合要求的数值进行标红报警处理，测试数据及测试结果

见图 10。利用该设备完成整套电缆测试只需要 2.5 个小时, 而之前人工测试往往需要 2 周以上的时间。测试结果表明, 该系统能够自动完成电缆中被测信号的测试通道切换, 可大幅度降低工作强度, 提高工作效率。

电缆号: K00P-1	绝缘电阻测试号: 0225-012	导通电阻测试号: 0204-112	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
2	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
3	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
4	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
5	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
6	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
7	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
8	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
9	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
10	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
11	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
12	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
13	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
14	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
15	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
16	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
17	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
18	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
19	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
20	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
21	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
22	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
23	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
24	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
25	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
26	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
27	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
28	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
29	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
30	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0

图 10 部分测试数据及结果

5 结论

本检测系统通过模块化设计进行系统搭建, 具备集成度高, 响应速度快, 精度高, 安全可靠的优点。通过在卫星总装测试过程中试用证明, 该测试仪能够满足星上电缆的导通绝缘测试需求, 能够对各种型号低频电缆的导通性、绝缘电阻等电气性能参数进行自动测量, 并能全面快速地检测电缆中可能存在的隐患, 提高测试速度, 缩短导通绝缘测试时间, 提高卫星总装生产效率。

(上接第 284 页)

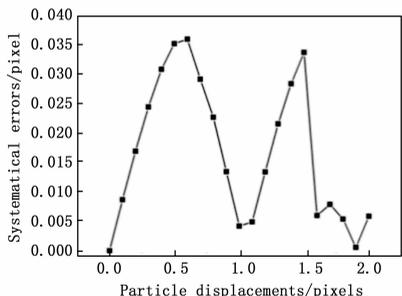


图 11 标定中的系统误差

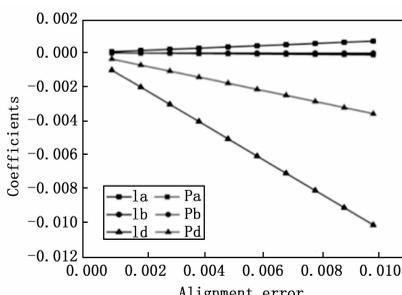


图 12 标定中的套准误差

7 结论

本文提出了一种在有气液界面条件下双目视觉定位中相机的标定技术, 有效解决了有折射现象存在时传统标定技术不再适用的难题。克服了封闭模型内的目标定位过程中不能现场标

参考文献:

[1] 刘根旺, 赵利军, 马瑞萍. 测试仪器的的发展及其对军用测试领域的影响 [J]. 计算机测量与控制, 2001, 9 (2): 1-2.

[2] 李 飞, 赵 伟, 郑华山. 自动多功能电缆测试仪的设计 [J]. 航天制造技术, 2012 (5).

[3] 高玉水, 李正优, 徐振辉. 某型导弹电缆网绝缘电阻测试仪 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (6): 816-817.

[4] 李 辉, 陈红飞. 电缆测试仪绝缘电阻测试单元的研制 [J]. 自动化技术与应用, 2011, 30 (1): 51-53.

[5] 李萃慧, 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.

[6] 李安国, 曹文智, 马晓波, 等. 整机绝缘耐压测试中绝缘电阻和耐压漏电流问题 [J]. 电工技术, 2011 (6): 63-64.

[7] SYNOR4200 型电缆测试仪使用手册 [OB/EL]. 法国: SEFELEC 公司, 2009.

[8] 孙玉胜, 邹玉炜, 崔光照, 等. 多芯电缆测试仪的研制 [J]. 微计算机信息, 2007, 23, 7-1: 192-194

[9] 宋宏江, 孟晓风, 王 琳. 数字式电缆测试仪的设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (2): 288-290

[10] 苏建军, 舟永丰, 于功教, 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

[11] 龙华伟, 顾永刚. LabVIEW 8.2.1 与 DAQ 数据采集 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[12] 沙占友. 新编实用数字化测量技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

定的困难。该技术能够应用于基于双目视觉原理的室内定位的标定过程。仿真结果显示, 用此方法进行标定, 误差水平能够达到实验精度要求。充分说明了本方法的可行性与可靠性。

参考文献:

[1] 赵 锐, 钟 榜, 朱祖礼, 等. 室内定位技术及应用综述 [J]. 电子科技, 2014, 3: 154-157.

[2] 余 扬, 赵凯飞, 沈 嘉. 室内定位技术应用、研究现状及展望 [J]. 电信网技术, 2014, 5: 46-49.

[3] Marr D, Ullman S, Poggio T A. Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information [M]. MIT Press, 2010.

[4] 马颂德. 计算机视觉: 计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[5] Mass H G, Gruen A, Papantoniou D. Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows Part 1. Photogrammetric determination of particle coordinates [J]. Experiments in Fluids, 1993, 15 (2): 133-146.

[6] Malik N, Dracos T, Papantoniou D. Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows Part 2. Particle tracking [J]. Experiments in Fluids, 1993, 15 (4/5): 279-294.

[7] Hoyer K, Holzner M, Luthi B, et al. 3D scanning particle tracking velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 2005, 39: 923-934.

[8] Holzner M, Liberzon A, Nikitin N, et al. A lagrangian investigation of the small-scale features of turbulent entrainment through particle tracking and direct numerical simulation [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 598: 465-475.