

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.013

某型导弹电缆网导通绝缘性能检测系统设计

韩琦文, 赵转萍, 梁 爽

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了改进传统导弹电缆网检测手段存在的效率低、可靠性差等问题, 在总结国内外电缆检测发展现状的基础上, 对电缆通断、导通和绝缘等检测的原理、硬件的总线级联、通信和集成、电缆转接、数据库和报表设计等方面进行了研究, 开发了一种以工控机、NX 电缆测试仪、低压高阻检测模块和电缆转接板为硬件, 基于 C# 和 SQL Server 2008 的通用电缆自动检测系统。系统通过 NX 电缆测试仪完成了导通、绝缘电阻检测, 专用模块以继电器开关矩阵和带串口的数字万用表分别进行了测点切换和数据采集实现低压高阻检测, 各硬件之间经串口或 USB 实现了通信; 通过分析电缆连接关系, 设计了电缆转接板实现检测端子的标准化、模块化。根据硬件结构和系统功能划分软件模块, 设计了数据库表及用户报表, 实现了检测结果的保存、查询和打印。检测及实验结果表明, 系统检测的分辨力、准确度、可靠性高, 稳定性好, 检测速度快, 性能满足要求。

关键词: 电缆网检测; NX 电缆测试仪; 测点切换; 电缆转接板

中图分类号: TH39; TM246⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)04-0442-06

Design of conduction and insulation performance test system for the cable net of a certain missile

HAN Qi-wen, ZHAO Zhuan-ping, LIANG Shuang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to improve the traditional testing means of missile cables which is low efficiency, poor reliability etc., on the basis of summarizing the current domestic and overseas development status of cable testing, the principle of cable disconnection, conduction, insulation and other detections, bus cascade, communication and integration of the hardware, cable switching, the design of database and report, etc., were studied and a general automatic cable detection system was developed based on industrial PC, NX harness detector, high resistance detection module under low voltage, cable adapter board and C# and SQL Server2008 as software development tools. The NX detector was used to complete the normal conduction, insulation test and the special test module which depends on relay switch matrix (used to switch from measuring points) and digital multimeter with serialport for data acquisition was designed to accomplish high resistance detecting under low voltage, multiple hardwares communicate between each other through serial ports and USB. By analysing the cable connection, a cable adapter board was designed to achieve the standardization and modularization of the test terminal. The software module was divided according to the hardware structure and system function, database tables and customer reports were designed to achieve the preservation, query and print of the detection results. Experimental results show that the system can detect with high resolution, accuracy and reliability, good stability, fast detection speed and meets the requirements.

Key words: cable net detection; NX harness detector; measurement point switching; cable adapter board

0 引言

电缆作为现在机电设备尤其是军用设备的“神经”和“血管”,为各部件提供动力能源、控制信号和数据信息^[1-2],对设备的正常工作至关重要,且随着技术的发展,设备内部电缆也愈趋复杂,这客观上对检测的手段、检测速度、自动化程度及可靠性提出了更高的要求。

国内部分科研机构 and 院校近年来在电缆检测领域进行了许多研究和探索^[3-6]:西北工业大学的宋志蛟、张安研制了一种基于便携式工控机、VC++、Access 数据库和 CAN 总线的新型的电缆综合测试系统;中国空间技术研究院的程海峰、张岩等人研制出一种整星低频电缆网自动测试仪;中国石油大学柳颖等人提出了由工控计算机、主测试仪和转接箱三大部分组成的绝缘电阻测试仪的技术方案等。但国内目前研究和生产的主要是中、低档的电缆测试仪器,主要性能指标比较低,且软、硬件功能较为专用,难以实现通用化检测。部分单位虽然购置了一些国外的先进检测设备,但这些设备价格昂贵,提供的参考资料和可供二次开发的接口较少,应用范围受限且换代升级受制于人,难以满足导弹电缆测试的具体化^[7]、特殊化的要求。这也使很多企业 and 军工单位依旧采用传统的人工检测方式,无论从效率及质量上都远远落后于西方发达国家。

为了满足用户提出的特殊需求,本研究综合考虑目前国内外电缆检测系统的优缺点,以 NX Hipot + 电缆测试仪为基础开发一套导弹电缆网自动检测系统,以弥补国内现有检测系统在检测精度、速度、检测可靠性、可扩展性和检测信息管理等方面的不足。

1 电缆电阻检测原理

对电缆性能的测量主要包括导通、二极管正反、导通电阻、绝缘电阻及元器件的电容、电感等项目,下面主要介绍常用的导通检测和电阻(包括导通和绝缘)检测原理。

1.1 导通电阻检测

标准两线接法测量所得到的结果是测试仪内阻、转接线阻、接触电阻以及被测物电阻的总和,在进行小电阻检测时,这些混入的电阻会极大地影响被测电阻。本研究采用 Kelvin 四线制测量方法将可自动补偿测试仪内阻、引线电阻和接触电阻,从而精确地测出被测元件的阻值。

Kelvin 四线接法电路图如图 1 所示。

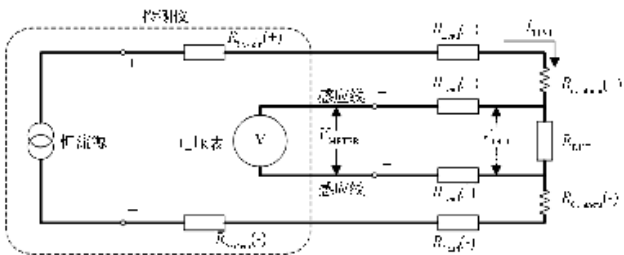


图 1 Kelvin 四线接法电路图

V_{METER} —测试仪所测电压, V_{DUT} —被测元件两端实际的电压值, R_{System} —系统内阻, R_{Lead} —检测引线电阻, $R_{Contact}$ —接触电阻。

由于电压表可以看作是阻值很大的电阻元件,电路中流经电流表的感应电流很小,故可得出:

$$V_{METER} = V_{DUT} \tag{1}$$

从而有:

$$R_{测} = \frac{V_{METER}}{I_{TEST}} = \frac{V_{DUT}}{I_{TEST}} = R_{实} \tag{2}$$

1.2 电缆通断检测

电缆网络通断^[8]检测电路主要包括 3 部分:采样比较电路、运算放大电路、AD 转换电路。电缆通断和绝缘电阻检测电路如图 2 所示。

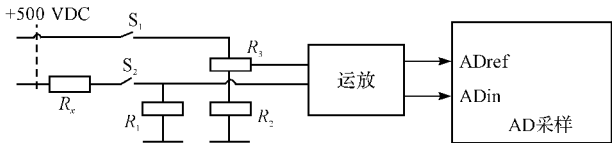


图 2 电缆通断和绝缘电阻检测电路

图 2 中,闭合 S1,断开 S2, R_1 接地作为参考地。在 S1 所在电路施加低压,若 S1 所在电路连接正常,则 AD 采样电压不为零。若线路存在断路,则 R_1 和 R_2 上的分压均为零,AD 采样电压为零。

1.3 绝缘电阻检测

绝缘电阻检测^[9]电路与电缆通断检测电路基本相同,区别主要在于绝缘电阻检测需要切换电源施加高压。如图 2 所示, R_X 表示两点的绝缘电阻,虚线表示两绝缘点虚拟连接。闭合 S1 和 S2 进行检测,此时图 2 中的电路可将 R_X 和 R_1 看作一路, R_2 和 R_3 为一,两路并联。 R_1 、 R_2 、 R_3 阻值固定,则当 R_X 变化时, R_2 上的分压不变而 R_1 电阻上有所变动,两个分压经运算放大器分别送入 AD 采样电路的采样端和参考电压端,经后续数据处理得出绝缘电阻检测结果。

2 检测系统设计

2.1 总体设计方案

导弹电缆网导通绝缘性能检测系统有特殊检测需求:检测精度要求高,部分电阻要求精确到 1 mΩ;被检

元器件种类多且关系复杂,阻值跨度大,从几 $\text{m}\Omega$ 到几 $\text{M}\Omega$ (即低压高阻);高压绝缘检测时部分测点不能加高压;分手动、自动两种检测方式。

为了同时满足导通小电阻、低压大电阻、绝缘电阻

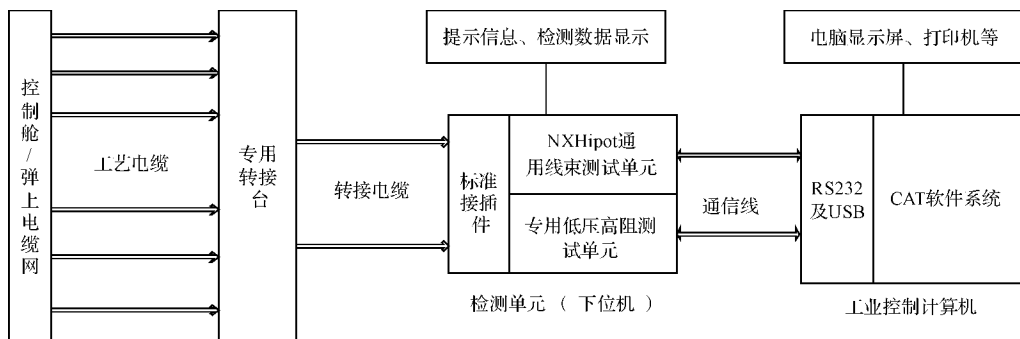


图3 电缆网导通绝缘性能检测系统组成框图

(1)工控机及 CAT 软件系统。提供测试过程中的人机交互界面、工艺文件和测试程序,通过 RS232 接口控制下位机完成产品的自动测试并接收测试数据,执行检测结果的判错,数据存储、查询及打印。

(2)NX Hipot + 电缆通用测试单元。接收工控机给出的测试数据、连接关系、测试条件,根据上位机命令执行对被测电缆网导通、绝缘自动测试,向上位机传输测试结果。

(3)电缆专用测试单元。设计专用测试方案和电路,执行低压大电阻检测程序。

(4)转接板/转接电缆。根据 CAT 软件确定的各接口关系信息,标准化被测电缆网和综合测试单元标准接插件之间的物理连接接口。

系统硬件以工控机为中心分为 3 部分:检测单元、工控机和其他辅助单元(音响及打印机)。其中,检测单元又分为通用检测模块和专用检测模块。检测单元、其他辅助单元与工控机之间通过 RS232 和 USB 接口进行通信。

2.2 通用检测模块

鉴于导弹电缆网的导通绝缘测试需求,本研究选用美国 Dynalab 公司生产的型号为 NX Hipot + 的电缆测试仪。该仪器提供最高 1 500 VDC 测试电压及最快每秒 1 024 个点的检测速度。采用普通接线法测量电阻时,测量的准确度为: $1\ \Omega \sim 100\ \Omega$ ($\pm 1\ \Omega$), $100\ \Omega \sim 2.2\ \text{M}\Omega$ ($\pm 1\%$);采用 Kelvin 接线法可用于测量小于 $1\ \Omega$ 的小电阻,精度达到 $1\ \text{m}\Omega$,准确度为: $0.005\ \Omega \sim 100\ \Omega$ ($\pm 0.005\ \Omega$, $\pm 1\%$),检测性能满足要求。

导弹被检电缆网的 4 个检测接口的针/孔数分别为:51、36、21、21,再加两支表笔和 25 个鳄鱼夹,笔者

等电缆网的自动检测需求,本研究采用了由通用电缆导通绝缘测试单元、专用低压高阻测试单元、转接装置以及 CAT 软件模块组成电缆网导通绝缘性能检测系统,系统构成如图 3 所示。

采用 Kelvin 接线法,每个测点对应两个测试地址,由此计算出测试仪需要提供至少: $(51 + 36 + 21 + 21 + 2 + 25) \times 2 = 312$ 个测点,所选用的 NX Hipot + 测试仪提供 512 个测试点的矩阵开关模块,测试点数满足要求。

NX Hipot + 测试仪自动运行的方法是通过接在测试仪串口 2 上的条形码扫描器来扫描一个代表检测程序名称或者部件编号的条码。受此启发,本研究在数据库中创建一个被检电缆网信息(如产品型号)与检测程序名相对应的数据表。检测时,系统通过用户输入的产品型号等信息,在数据库中查询对应的检测程序,如果不存在,则提醒用户添加;如果存在,则通过串口发送至 NX Hipot + 测试仪,测试仪自动搜索执行。

2.3 专用检测模块

专用检测模块选用继电器矩阵开关电路板及带有串口传输功能的数字表分别实现测点切换和数据采集。每块继电器控制板有 16 路,共 48 路,可测量 24 个点。16 路继电器控制板的正常电源电压为 12 VDC,有 16 路双掷开关接口,采用 485 协议通信,波特率 9 600,8 个数据位,一个停止位,无校验位。16 路继电器控制板可设置地址 0 ~ 255,多机级联最多控制 $16 \times 256 = 4\ 096$ 个节点。继电器开关矩阵电路的主要作用是在测量时根据要求控制不同的外部被测导线接入测量电路^[10]。

测量仪器选用优利德 UT61E 型号数字万用表。该数字万用表具备自动量程转换等特点,并有 RS - 232 标准数据传输接口,在 $220\ \Omega \sim 220\ \text{M}\Omega$ 量程范围内的测量准确度为: $\pm (0.5\% + 10)$,完全满足检测需求。检测时,将万用表的正、负端分别接入继电器开关矩阵电路中,由工控机的专用测试软件模块控制矩阵

电路实现检测点的切换,万用表负责采集数据并通过串口将测量结果传给上位机。专用测试单元电路图如

图 4 所示(若要测量 A、B 两点间的电阻,使继电器 2、3 闭合,其余断开即可)。

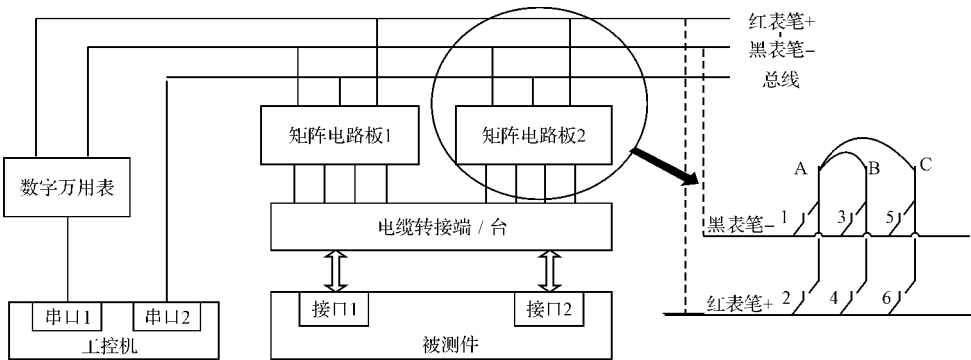


图 4 专用测试单元电路图

2.4 电缆转接模块设计

为了能够满足检测时检测线末端和被测件电缆网接口的准确、可靠、快速插拔,同时实现被检测件的无关性和系统的通用性,便于兼容和扩展其他型号或类型的设备电缆网,本研究在被测件电缆网和测试仪之

间设计电缆转接模块,转接模块包括通用转接板、转接电缆和工艺电缆 3 部分,通用转接板上具有标准规格的检测接口,便于外部检测件工艺电缆的快速接入和拔出。

电缆转接关系示意图如图 5 所示。

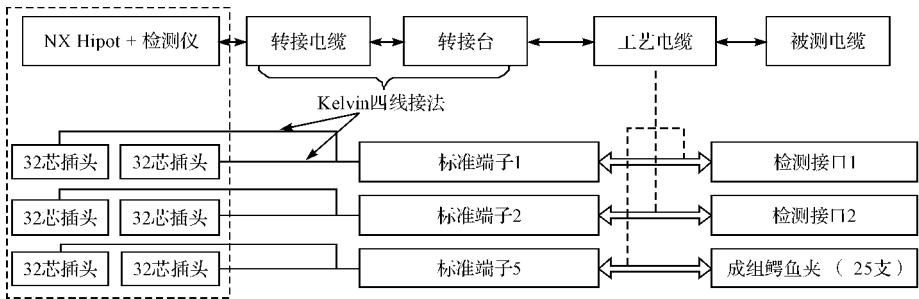


图 5 电缆转接关系示意图

对连接 NX Hipot + 测试仪与转接台的转接电缆而言,由于采用的是 Kelvin 四线接法,这部分引入的电阻被消除。但连接被测件与电缆转接台的工艺电缆和接线头的阻值,在检测时会被当作实际阻值,从而使检测值与实际值有较大的偏差。这部分转接引入的阻值可通过校零环节来消除。校零的过程与检测过程相同,只是需要将所有检测端子短接在一起(通过一个所有端子连通的校零件实现),经检测流程得到的便是各个工艺电缆的线阻值。本研究将线阻值按照对应关系存储到数据库中,以后每次进行常规检测时,均可查询数据库获得每一连接关系(即每两点之间)对应的线阻,将该电阻作为校零电阻,用于测量值修正,即可得到精确的电阻值。

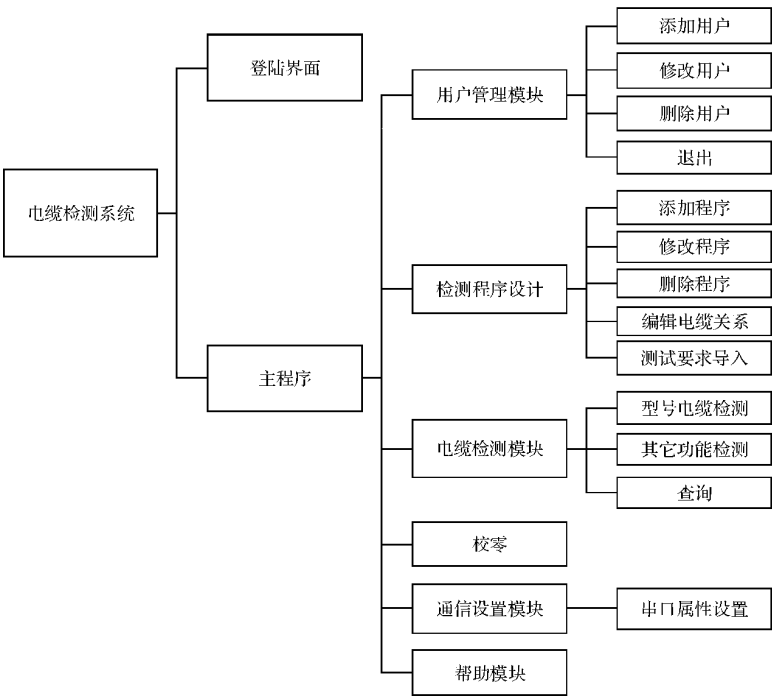
2.5 软件系统功能设计

检测系统软件主要用于实现用户交互、硬件通讯、发送控制指令及采集数据、测试数据的评定、保存、查

询、删除、修改,以特定的数据格式打印检测结果报表等功能。系统的功能模块划分如图 6 所示。

测试程序设计模块集成了与程序设计与编辑相关的功能。首先,该模块能调用 NX Editor 软件来编写 NX 检测仪的检测程序。NX Editor 软件功能强大,采用模块化、图形化的编程方式,易学易用。检测程序编写完成后可直接通过 USB 接口下传给 NX 检测仪;其次,可以一次性导入 Excel 格式的带有每个连接关系性能指标的标准连接关系表,导入快捷,方便更新;还可与数据库交互,添加、删除、修改与程序相关的数据表。

电缆检测模块用于产品检测,数据保存、查询、打印。“型号电缆检测”用于对系统针对性开发的控制舱电缆的检测,用户需要输入产品型号和编号才能进行检测;“其它功能检测”用于扩展的、其他型号或类型的电缆检测,功能相对简单;“查询”用于查询检测



结果,并对检索出的结果进行打印(有水晶报表和 Excel 两种打印选择)。

校准模块主要用于消除测量小电阻时从产品接口到转接板端子之间的线阻(即图 5 所示的工艺电缆阻值)。

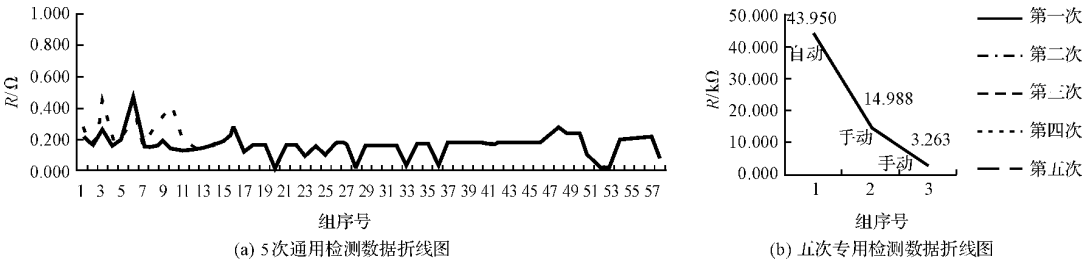
3 检测结果分析及性能验证

本研究对 61 组连接关系进行 5 次重复检测(包括自动和手动检测),所测结果如表 1 所示。

表 1 检测数据

起点	终点	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	要求	备注
XS2-22	XS2-2	43.910	43.590	43.300	43.550	43.400	40 K < R < 50 K	专用自动(100 K 档)
A1-7	A1-8	14.983	14.997	14.980	14.998	14.997	1 K < R < 25 K	专用手动(22 K 档)
A1-9	A1-10	3.263	3.252	3.261	3.257	3.256	1 K < R < 25 K	
XS2-29	A1-1	0.227	0.202	0.203	0.268	0.201	< 1	通用手动(1 Ω 档)
B1-11	A1-3	0.274	0.437	0.254	0.290	0.231	< 1	
.....								
XS2-35	B1-10	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	< 1	
XS2-1	XP1-1	0.161	0.162	0.167	0.175	0.160	< 1	通用自动(1 Ω 档)
XS2-1	XP1-2	0.162	0.164	0.158	0.161	0.162	< 1	
.....								
XS2-28	XS2-32	0.078	0.072	0.074	0.070	0.072	< 1	

通过计算分析检测数据,5 次检测的阻值折线图如图 7 所示。



注:(a)图中从第 18 开始为自动检测项

由图 7 可知,所有检测项均满足检测要求(表 1 “要求”列)。

本研究检测的所有 61 组连接关系阻值分布不一,量级从 mΩ 到 kΩ,系统在检测过程中对每个量级使用

不同的档位,根据测试仪说明,所测 61 组阻值的档位分别为 100 k Ω 、22 k Ω 和 1 Ω 档(详见表 1 备注),所以宜采用最大引用误差^[11]作为衡量系统精确度的标准。

最大引用误差计算公式为:

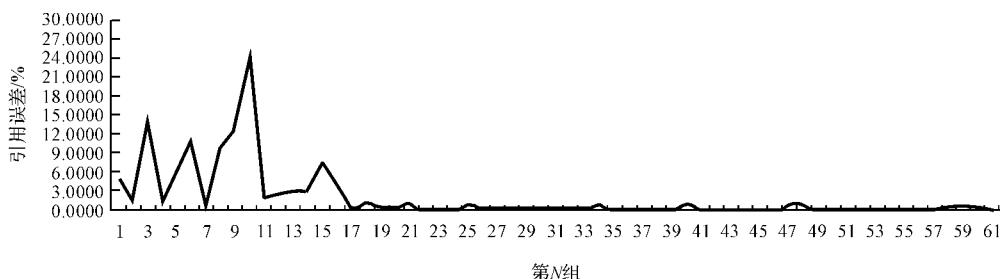


图 8 5 次检测数据最大引用误差(通用+专用)

注:1~17—通用手动;18~58—通用自动;59—专用自动;60,61—专用手动

根据以上检测结果可知,除了通用检测模块手动测量的值较大外,专用测量和通用自动模块所测值的引用误差均小于 1%。这是由于自动测量时不存在人为(如表笔与测点间的接触电阻)引入的测量误差,专用手动模块编写了判定读数稳定的程序,检测值趋于真实值,而通用手动模块是通过设定采集阈值控制读取。以表 1 中的第四项为例,假定阈值设为 0.7 Ω ,则只要被测值小于 0.7 Ω ,NX Hipot+测试仪就采集数据,由此造成检测值会在一定范围内波动,通过设置合理的阈值可减小由此造成的误差,但就判断阻值的合格性(如只需判断小于 1 Ω 即可)而言,通用手动引起的引用误差可以不予考虑。综上所述,系统满足设计要求。

4 结束语

导弹电缆网导通绝缘性能检测系统,充分利用了国外电缆测试仪器在功能、速度、精度、可靠性等方面的优势,具有很高的自动化程度,只需一名测试人员即可完成所有电缆性能的测试操作,使得检测效率和检测性能成倍提高。系统不仅能准确、快速地对弹上电缆和控制舱内部点进行导通、绝缘检测,还可灵活编写检测程序实现对不同点数、不同种类的产品进行通用检测。同时,该系统还将相应的检测数据、检测结果保存至数据库,并能够查询、打印数据报表,便于后续故

$$\gamma_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} \Delta_i / (\text{测量范围的上限} - \text{测量范围的下限}) \quad (3)$$

式中: $\gamma_{\max}$ —最大引用误差; Δ_i —第 i 个值的绝对误差。

根据式(3)计算出 5 次检测每个检测电阻的最大引用误差,其折线图如图 8 所示。

障排查和产品分析、改进。

参考文献(References):

- [1] 罗孝兵,赵转萍. 航空电缆故障自动检测集成系统[J]. 工业控制计算机,2003,16(3):5-7.
- [2] 李苹慧,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.
- [3] 宋志蛟,张安,王强. 飞机 CAN 总线线缆测试系统设计[J]. 火力与指挥控制,2015,40(3):137-141.
- [4] 程海峰,张岩,焦荣惠,等. 一种整星低频电缆网自动测试仪的功能实现[J]. 航天器环境工程,2015,32(5):500-503.
- [5] 柳颖,马西庚. 导弹电缆通断与绝缘电阻测试仪的研制[D]. 青岛:中国石油大学信息与通信工程学院,2010.
- [6] 周恒,刘振兴. 基于 ATmega128 单片机的电缆检测系统设计[D]. 武汉:武汉科技大学信息科学与工程学院,2008.
- [7] 柳颖,钟建强,高明,等. 新型电缆测试仪的方案设计[J]. 机电产品开发与创新,2011,24(2):162-163+186.
- [8] 罗云林,吴林. 航空多芯电缆监测系统的设计[J]. 控制工程,2009,16(3):342-345.
- [9] 张志利,侯传勋,龙勇,等. 智能多芯电缆测试仪的研制[J]. 自动化仪表,2007,28(1):19-22,25.
- [10] 徐超,武东健,姜祝. 电缆网阻值测试仪的设计与实现[J]. 宇航计测技术,2014,34(2):43-46.
- [11] hua1938284910. 引用误差[OL]. [2012-05-12]. <http://wenku.baidu.com/view/0d1cf08471fe910ef12df87e.html>.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

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.

HAN Qi-wen, ZHAO Zhuan-ping, LIANG Shuang. Design of conduction and insulation performance test system for the cable net of a certain missile[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(4):442-447.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>