

卫星热响应测试系统设计

江浩, 宋歌, 张学迅, 张鹏

(上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 为实现卫星热控回路热响应关系的快速自动化测量, 开发了一种基于虚拟仪器的自动化测试系统; 该系统集成了数字万用表、矩阵开关、程控直流电源及转接电缆等硬件, 适用于多种卫星接口, 最多可实现 120 个节点测试, 阻值测量精度可达 $0.1+0.01\%$ FS; 在 LabVIEW 平台下使用操作者框架开发了上位机测试操作软件并采用了模块化设计, 通过 LXI 总线控制开关切换数字万用表及直流电源实现了热控回路节点连接关系、负载阻值及热响应测试功能; 软件除了具备常规的数据存储及调用查看功能, 还可对比用户设计输入及实际测试结果进行合格性判断并生成测试报表; 与人工热响应的对比测试及实际应用表明, 该系统硬件集成度高, 测试结果精确可靠, 效率高, 操作使用简单, 方便现场使用, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 虚拟仪器; 热响应; 操作者框架; 热控回路

Design and Implementation on Satellite Thermal Response Test System

JIANG Hao, SONG Ge, ZHANG Xuexun, ZHANG Peng

(Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China)

Abstract: To realize rapid automatic thermal response measurement for satellite thermal control circuit, a automatic test system based on the virtual instrument is developed. The system integrated the hardwares of digital multi-meter, matrix switch, programable DC power supply and transfer cables. The transfer cables are applicable to multiple satellite interfaces, and the system can measure up to 120 points in a single test. The system resistance measurement accuracy can reach by $0.1+0.01\%$ of full scale (FS). The correspondent operation software is developed in Labview platform, which adopts the modular design. The circuit connecting relationship, load resistance measurement and thermal response test can be implemented automatically through the LXI bus control switch alternation. Apart from the data management, report generation and qualification judgment, the comparing design inputs and practical test results are also made the qualified judgement and generated to the test report. By comparing with the artificial thermal response properties, the system hardware is highly integrated, and the measured results are accurate and reliable. The system is easy to operate and use in the field. It has good engineering application value.

Keywords: virtual instrument; thermal response; actor framework; thermal control circuit

0 引言

为使卫星的热参数, 如温度、温度差和温度梯度等满足总体设计要求, 必须进行正确的热控设计, 热控分系统是卫星众多重要系统之一^[1]。图 1 所示为典型的由加热器—热敏电阻组成的热控加热回路, 加热器及热敏电阻在粘贴完毕后, 其接线需按照设计文件分别接焊接到卫星指定的接插件的指定点上。在回路安装完毕后, 必须进行热响应测试以验证该回路安装正确。一般而言, 热响应测试包含以下内容及步骤:

1) 加热器及热敏电阻接线与星上接插件节点对应接入关系及加热器阻值测试;

2) 加热器与热敏电阻安装对应关系测试。

由于加热器及热敏电阻都有一定的阻值, 第一项测试内容实际上等效于电缆—负载网络的导通绝缘及阻值测试。程海峰^[2]研制了整星低频电缆网自动测试仪, 实现了电缆网导通绝缘状态的自动测试; 刘泽元^[3]设计了一套基于 PXI

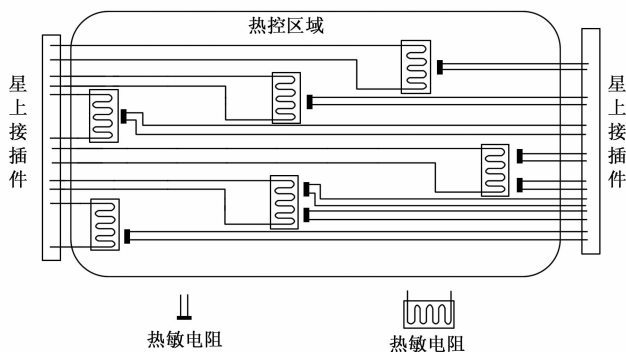


图 1 热响应待测回路示意图

总线的航天器热试验加热电缆绝缘自动测试系统, 通过继电器矩阵切换加热电缆接入点, 实现了多芯电缆自动扫描以及对地绝缘电阻的测量。魏鹏^[4]与江浩^[5]同样利用万用表加开关矩阵切换待测回路节点的原理分别开发了卫星电缆导通绝缘自动测试仪及星上热控回路阻值测试系统。苏建

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2022-10-26。

作者简介: 江浩(1981-), 男, 安徽桐城人, 博士, 研究员, 主要从事测控仪器开发工作方向的研究。

引用格式: 江浩, 宋歌, 张学迅, 等. 卫星热响应测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(5): 28-33.

军、宋宏江等^[6-8]基于嵌入式计算机技术, 分别开发了便携导弹电缆测试仪及数字式电缆测试仪, 可以实现电缆的导通测试和绝缘测抗电强度测试。第二项测试内容, 主要利用电源对加热器进行加热, 然后测量对应热敏电阻的温度变化来验证加热器与热敏电阻的对应安装关系。韩熙^[9]设计了真空热实验参考点热响应测试系统, 然而该方案仅适用于 3 个已知节点连接特性参考点热响应测试。孙兴华^[10]设计了真空热试验热响应测试程序, 适用于电源—加热器—测温元件—对应的场合, 可快速检测加热点与测温点的热响应关系。

实际在进行星上热响应测试时, 加热器及热敏电阻回路不仅对应关系复杂, 存在一点加热多点测量的情况, 配备的加热电源也仅有一台。因此, 目前的热响应测试模式还是依靠测试人员手动将电源接入到某一加热片并控制电源上电加热, 另一测试人员使用万用表逐点测试热敏电阻阻值, 然后查热敏电阻温度映射表计算温度并人工判断对应关系这一方法。该方法不仅费时费力, 出错概率也较高, 因此急需开发能够一次满足两项测试内容的自动化测试系统。

根据星上热响应测试任务需求, 设计开发了一种基于虚拟仪器的自动化热响应测试系统, 通过使用模块化的数字万用表、矩阵开关及程控电源, 在软件的控制下自动完成热控回路的热响应各项测试任务, 具有测试自动化程度及效率高, 使用方便灵活, 测试结果准确等优点。

1 测试需求及原理

根据卫星热响应测试需求, 系统应该能够自动检测加热器、热敏电阻的节点连接特性, 阻值特性及其热响应关系, 并根据用户输入的设计文件内容进行合格性判断, 自动保存测试结果并生成指定格式报表。测试系统应具备图形化操作界面, 用户可以对常用测试选项进行设置, 具备温度, 电流, 电压超限安全保护功能。测试系统主要技术指标如下:

- 1) 测试接入节点个数: 120 个;
- 2) 加热最大功率: 600 W, 最大电流: 4A, 最大电压: 150 V;
- 3) 程控电流精度: 0.5% 设定值, 程控电压精度: 0.25% 设定值;
- 4) 阻值测量精度: $0.1 + 0.01\%FS$;
- 5) 适配接插件型号: 13 种。

根据测试需求, 测试系统硬件采用程控电源, 矩阵开关及数字万用表的设计方案。其核心是通过切换矩阵开关将待测回路的不同节点接入程控直流电源或数字万用表, 实现回路加热以及阻值或温度测试。图 2 所示为矩阵开关切换指定待测节点并将其接入阻值测试或加热回路原理图。当行开关接入的是数字万用表时, 列 1 行 1 及列 2 行 2 的开关闭合时, 构成了回路节点 1 和节点 2 之间电阻测试回路。同理, 如当行开关接入的是程控电源时, 列 1 行 1 及列 2 行 2 的开关闭合时, 构成了回路节点 1 和节点 2 之间的加热回

路。热响应测试时, 闭合连接程控电源矩阵开关的不同列接头将加热回路中指定的加热器接入直流电源的输出端, 上位机控制直流电源对其加热。同时, 上位机控制数字万用表及其连接矩阵开关扫描测量热敏电阻的阻值, 并根据热敏电阻阻值—温度分度表计算对应的温度, 获得指定加热器加热时所有测温点的升温情况, 即可判断加热器—热敏电阻的响应关系。

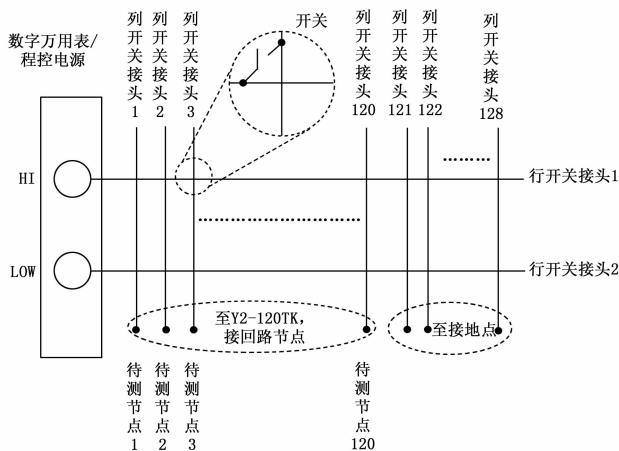


图 2 矩阵开关切换测试示意图

2 硬件设计及选型

图 3 所示为热响应自动测试系统硬件结构框图。图中上位机与 PXI 机箱及直流电源通过网线连接通信。两块 2×128 矩阵开关板卡及数字万用表插在 PXI 机箱内, 机箱的背板插槽为其供电并交互数据。其中一个矩阵开关两个行开关接头与数字万用表的正负表柱相连接, 列开关接头与 Y2-120TK 航空插座相连接, 另一个矩阵开关两个行开关接头程控直流电源输出正负极相连接, 列开关接头与 Y2-120TK 航空插头相连接座。这两个航空插头是连接测试系统与星上待测回路的统一接口。

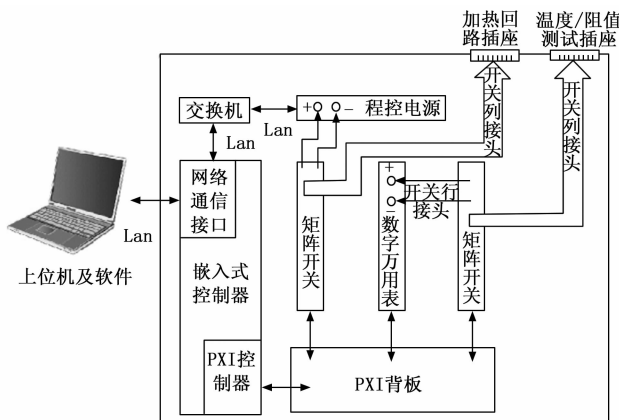


图 3 热响应自动测试系统结构框图

由于星上待测回路的接口形式多样, 因此制作不同规格的转接电缆共 13 根, 每根电缆的一端为 Y2-120ZJ 航空插头与测试系统相连接, 另一端根据实际需求连接了不同形

式的接插件并与待测回路的星上接出接插件相匹配，对实际卫星型号基本上做到了全覆盖。转接电缆决定了待测回路节点与测试系统的矩阵开关列开关接头之间的对应关系，使用时根据需实际情况正确选择。表 1 列出了转接电缆编号、星上回路接插件型号、接头节点编号对应关系。

表 1 转接电缆接头型号及节点编号对应表

转接电缆编号	星上回路端接插件			测试机接插件节点
	接头	型号	节点	
X01	F01	J30JHJ100TJ00S01-AP	1~100	1~100
X02	F01	J14A-101ZKL	1~101	1~101
X03	F01	J14A-74ZKL	1~74	1~74
	F02	J14A-38ZKL	1~38	75~112
X04	F01	J14A-62TJ	1~62	1~62
	F02	J36A-52TJ	1~52	63~114
X05	F01	J36A-74ZKL	1~74	1~74
	F02	J36A-38TK	1~38	75~112
X06	F01	J36A-38ZKL	1~38	1~38
	F02	J14A-51ZKL	1~51	39~89
	F03	J14A-26TK	1~26	90~115
X07	F01	J36A-62ZKL	1~62	1~62
	F02	J36A-52TK	1~52	63~114
X08	F01	J14A-51TK	1~51	1~51
	F02	J36A-26ZKL	1~26	52~77
	F03	J36A-38TJ	1~38	78~115
X09	F01	J36A-62TK	1~62	1~62
	F02	J36A-52ZKL	1~52	63~115
X10	F01	J30JHT100ZK00N01	1~100	1~100
	F02	J14A-9TK	1~9	101~109
X11	F01	Y2-36TK	1~36	1~36
	F02	J14A-15TK	1~15	37~51
	F03	J14A-26TK	1~26	52~77
	F04	J14A-38ZKL	1~38	78~115
X12	F01	J14A-62ZKL	1~62	1~62
	F02	J14A-51TJ	1~52	63~113
X13	F01	J14A-15TJ	1~15	1~15
	F02	J14A-26ZKL	1~26	16~41
	F03	J36A-26TK	1~26	42~67
	F04	J14A-38TK	1~38	68~105

3 软件设计

测试软件部分基于 LabVIEW 开发，它是美国国家仪器 (NI) 公司研制的程序开发环境。LabVIEW 被称为“G”语言，即图形化编程语言^[11-12]，其核心是“数据流”，通过数据在连线上的流动，实现程序流程的控制及功能的实现，是测试测量领域主流工具^[13]

3.1 软件模块及架构

热响应测试系统软件根据测试的功能需求将软件分为节点连接关系及阻值测试、热响应测试及数据管理三大模块，每个模块包含若干小的功能模块，如图 4 所示。

整个软件在测试时，需要对电源，矩阵开关及数字万

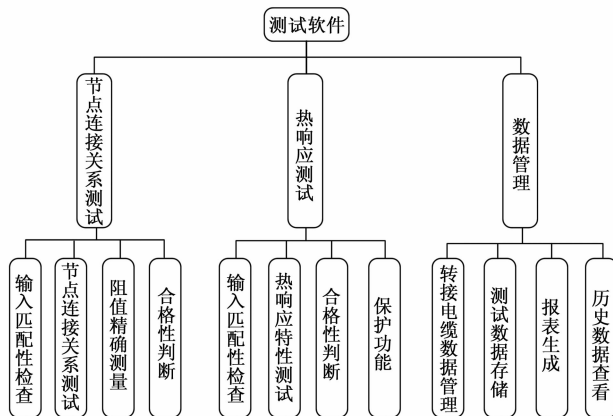


图 4 软件功能模块

用表进行控制，同时响应用户的指令并实时更新显示测试数据，是一个典型的并发式多线程任务。为此，软件设计时采用了 Labview 的操作者框架 (Actor Framework)。操作者框架是一个软件类库，用以支持编写有多个独立运行且相互间可通信的应用程序。在该类型应用程序中，每个操作者 (Actor) 执行着一组独立的系统任务，操作者本身维持着自己的内部状态，并通过统一接口形式的消息 (Message) 与其它的操作者相互通信^[14-15]。本软件基本架构设计如图 5 所示。

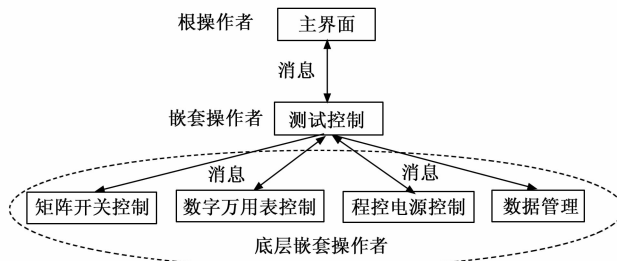


图 5 软件架构设计

图中主界面为根操作者，测试控制为其嵌套操作者，矩阵开关控制、程控电源控制、数字万用表控制及数据库操作又作为测试控制的底层嵌套操作者。主界面接受用户各种输入，并将其传递给测试控制。测试控制相当于软件的大脑，在后台运行，根据用户输入将测试任务分解为矩阵开关、万用表及程控电源的动作。矩阵开关、万用表及程控电源在测试控制下相互配合完成测试过程，同时以消息的形式向测试控制发送自身产生的数据及状态，测试控制接收后向主界面发送并显示。数据管理操作者完成数据管理任务，它不操作设备硬件，主要涉及的是文件及数据库操作。在图 5 所示的架构下，消息仅在根操作者与其嵌套操作者中之间传递，同一层级的操作者实现了相互解耦，可极大提高代码的复用性。

3.2 节点连接关系及阻值测试

用户在使用时，需导入待测回路设计表，选择转接电缆型号，输入待测回路名称，该回路名称将是最终生成的

数据文件名称的一部分。开始测试后, 软件根据输入的转接电缆型号调取转接电缆数据库中内容判断设计表中的待测回路及转接电缆是否匹配, 如成功匹配则进入连接关系及阻值测试, 不成功则提示用户检查转接电缆及待测回路设计表。连接关系测试等同于电缆一负载网络的导通绝缘及阻值测试。软件首先将数字万用表置于最大量程, 采用二分法测试接入网络节点的导通绝缘关系, 该方法相比星上热控回路阻值测试系统^[5]中所采用的遍历法可大大节省测试时间。导通绝缘测试结束后对比待测回路设计表, 判断两种形式的不合格: 应连通节点绝缘及应绝缘节点连通。完成上述步骤后, 软件根据所测连通节点的最大阻值设置合适的量程, 再次测量连通节点的阻值, 在测量时会减去转接电缆数据库中存储的线缆内阻以保证测量结果的准确性。测量结束后软件判断第三种形式的不合格: 阻值超限。所有测试结果将以表格形式呈现, 如图 6 所示。如果测试结果与待测回路设计表中的连通节点及阻值对比判断合格, 表明待测热控回路第一项测试通过。

序号	电缆接插编号	电缆接插型号	测试1	测试2	应测热敏电阻名称	设计阻值 (Ω)	实测阻值 (Ω)	绝缘电阻 (Ω)	合格性判断
1	F02	J36A-262XL	1	2	54237	6596.812210			合格
2	F02	J36A-262XL	3	4	54236	6667.289227			合格
3	F02	J36A-262XL	5	6	45864	6660.238074			合格
4	F02	J36A-262XL	7	8	54234	6346.130748			合格
5	F02	J36A-262XL	9	10	54235	6486.791736			合格
6	F02	J36A-262XL	11	12	54238	应该导通, 实测绝缘			不合格
7	F02	J36A-262XL	13	14	54239	应该导通, 实测绝缘			不合格
8	F02	J36A-262XL	15	16	54240	应该导通, 实测绝缘			不合格
9	F02	J36A-262XL	17	18	54241	应该导通, 实测绝缘			不合格

图 6 导通绝缘及阻值测试结果

3.3 热响应测试

热敏电阻及加热器回路的连接关系测试通过后, 执行热响应测试。用户需要导入热敏电阻回路设计表, 加热器回路设计表, 热敏电阻一加热器热响应设计表, 选择两种回路的转接电缆。用户还需输入加热时间(分钟)、加热功率(W, 该输入带保护功能, 最大上限为 30 W)、以及合格温升(°C)。热响应测试带有保护功能, 用户输入保护温度, 保护电流(A)及保护电压(V)。

热响应测试时, 软件同样先执行输入匹配性检查, 确保回路转接电缆型号与设计表相对应, 同时检查确认热敏电阻一加热器热响应设计表中各热敏电阻及加热器均包含在导入的热敏电阻回路及加热器回路设计表中。匹配性检查通过后, 软件将根据热敏电阻一加热器热响应设计表中的加热器名称逐一按照设置的加热时间和加热功率来为各加热器加热, 同时扫描测量热敏电阻回路各个测量点的阻值并转换为温度。每完成一个加热器加热, 根据用户输入的合格温升作为判断响应的依据, 从而得出与其响应的所有热敏电阻。当所有加热器均加热完毕后, 即可得到整个回路的加热器一热敏电阻热响应关系, 并与用户导入的热响应设计表对比以判断合格性。不合格包含两种情况: 加热器加热后设计对应的热敏电阻未响应以及非设计对应的热敏电阻产生了响应。软件在执行检测任务时持续监控所有热敏电阻的温度, 电源电流及电压, 任一数据超限即发

出警报并将电源输出置零后关闭, 打开所有开关节点, 以保护回路及卫星安全。

图 7 所示为热响应测试结果, 图中最上方显示了当前加热器名称, 实时加热时间、功率及电流。图中上方左侧为所有测温热敏电阻的当前温度及加热前温度, 右侧则以图形的形式显示了所有测温点的温度一时间曲线。最右侧为报警指示灯。图中最下方为热响应温升汇总表, 汇总了每一个加热器加热后, 所有热敏电阻的温升情况。热响应符合设计表的不做标记; 对于前述第一种热响应不合格, 在对应的行列做出蓝色标记; 对于第二种热响应不合格, 在对应的行列做出红色标记。通过图形和表格的形式实时显示加热和温度情况, 不仅提供的信息全面丰富, 而且也非常直观。

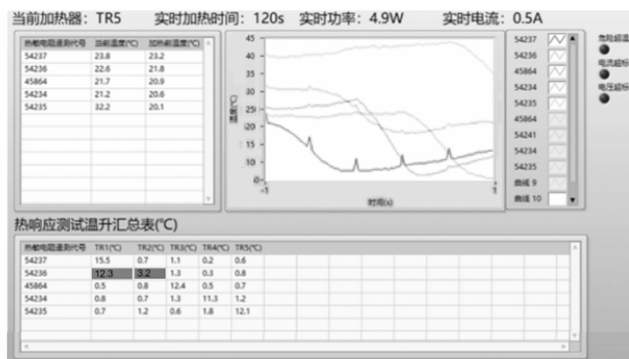


图 7 热响应测试结果显示

3.4 数据管理

数据管理包含转接电缆数据管理, 测试数据存储, 报表生成以及历史数据查看等功能。转接电缆数据库存储了转接电缆名称、接插件型号、接插件节点与测试系统的矩阵开关列开关接头之间对应关系以及转接电缆内阻等信息。转接电缆数据管理功能支持增加、编辑及删除转接电缆的功能。如因测试需要新制作了转接电缆, 可以通过该功能将其加入数据库中型号。测试数据存储在每次测试结束后自动执行, 文件格式为 TDMS 且不可编辑, 保证原始数据的安全性; 报表生成功能则将原始数据保存为用户指定格式的 Excel 报表。表 2 (a) 所示为热敏电阻回路节点连接关系测试报表, 包含了热敏电阻的节点连接关系及合格性判断, 由于热敏电阻阻值与温度有关, 对其合格性判断不包含对阻值范围的判断。表 2 (b) 所示为加热器回路节点连接关系及阻值测试报表, 同样包含了回路节点连接关系以及合格性判断, 其合格性除了连接关系之外还包含了对阻值范围的判断。报表内容丰富, 方便查看。

热响应测试报表, 由多个页面组成, 内容为每一个加热器对应的热响应测试结果、合格性判断及温升汇总表。单个加热器的报表中包含了每个加热器的名称、接插件型号、节点编号、设计响应热敏电阻、实测响应热敏电阻、温升判断阈值以及加热开始和结束时间。表 3 (a) 表明 TR1 加热器的实际响应热敏电阻与设计相符合, 结论合

格；表 3 (b) 表明 TR2 加热器的设计响应热敏电阻 54 236 未响应，结论不合格；表 3 (c) 表明 TR3 加热器设计响应热敏电阻 54 234 未响应，非设计响应热敏电阻 54 236 有响应，结论不合格；表 3 (d) 为温升汇总结果，供用户对比判断。

温数据库管理的历史数据查看功能可以让用户调取存储的原始测试结果文件并显示在软件界面中以表格和图形的形式查看，不仅更加直观，也可以方便与报表做对比检查，确保数据的准确有效。

表 2 节点连接关系及阻值测试报表

(a) 热敏电阻回路节点连接关系测试报表

序号	电连接器		端点 1	端点 3	热敏电阻名称	导通/绝缘设计		实测阻值/ Ω	合格判断
	编号	型号				设计	实测		
1	F02	J36 A-26 ZKL	1	2	54 237	导通	导通	5 376.32	合格
2			3	4	54 236	导通	导通	5 523.26	合格
3			5	6	54 864	导通	导通	5 494.21	合格
4			7	8	54 234	导通	导通	5 513.87	合格
5			9	10	54 235	导通	绝缘	/	不合格
6			13	14	54 239	导通	绝缘	/	不合格
7			15	16	54 240	绝缘	导通	5 479.32	不合格

(b) 加热器回路节点连接关系及阻值测试报表

序号	电连接器		端点 1	端点 3	加热器名称	阻值/ Ω		误差容限/ Ω	合格判断
	编号	型号				设计	实测		
1	F02	J14 A-38 ZKL	1	2	TR1	112.74	112.65	2	合格
2			3	4	TR2	113.18	112.12	2	合格
3			7	8	TR3	112.60	112.46	2	合格
4			9	10	TR4	112.91	115.79	2	不合格
5			11	12	TR5	112.91	绝缘	2	不合格
6			13	14	TR6	112.91	绝缘	2	不合格
7			5	6	/	绝缘	112.77	/	不合格

表 3 热响应测试报表

(a) TR1 加热器

加热器名称	TR1		
电连接器编号	F02		
电连接器型号	J14A-38ZKL		
加热器端点	1,2		
加热开始时间	19:14:10		
加热结束时间	19:14:41		
温升判断阈值/ $^{\circ}\text{C}$	10		
合格性判断	合格		
热敏电阻名称	设计	54 235	54 237
	实测	54 235	5 4237
热敏电阻电连接器编号	设计	F02	
	实测	F02	
热敏电阻电连接器型号	设计	J36A-26ZKL	
	实测	J36A-26ZKL	
热敏电阻端点	设计	9,10	1,2
	实测	9,10	1,2

(b) TR2 加热器

TR2	加热器名称	
电连接器编号	F02	
电连接器型号	J14A-38ZKL	
加热器端点	3, 4	
加热开始时间	19: 14: 41	
加热结束时间	19: 15: 12	
温升判断阈值/ $^{\circ}\text{C}$	10	
合格性判断	不合格	
热敏电阻名称	设计	54236
	实测	不存在
热敏电阻电连接器编号	设计	F02
	实测	不存在
热敏电阻电连接器型号	设计	J36A-26ZKL
	实测	不存在
热敏电阻端点	设计	3, 4
	实测	不存在

(c) TR3 加热器

TR3	加热器名称		
电连接器编号	F02		
电连接器型号	J14A-38ZKL		
加热器端点	5, 6		
加热开始时间	19: 15: 13		
加热结束时间	19: 14: 45		
温升判断阈值/ $^{\circ}\text{C}$	10		
合格性判断	不合格		
热敏电阻名称	设计	54864	54234
	实测	54864	54234
热敏电阻电连接器编号	设计	F02	
	实测	F02	
热敏电阻电连接器型号	设计	J36A-26ZKL	
	实测	J36A-26ZKL	
热敏电阻端点	设计	5, 6	7, 8
	实测	5, 6	3, 4

(d) 温升汇总表

序号	热敏电阻名称	加热器加热温升/ $^{\circ}\text{C}$		
		TR1	TR2	TR3
1	54 235	13.2	0.2	0.1
2	54 237	11.2	8.2	0.2
3	54 236	0.1	6.8	11.3
4	54 864	0.3	0.2	18.5
5	54 234	0.2	0	0.1

4 试验结果与分析

为检验测试系统的准确性，将该系统连接到星上热控回路网络进行了热响应测试，并与人工手持万用表标定测试进行对比，比较二者之间的连接关系识别的准确性，阻值测试误差，热响应关系识别准确性以及测试时间。

自动化的测试流程如图 8 所示。

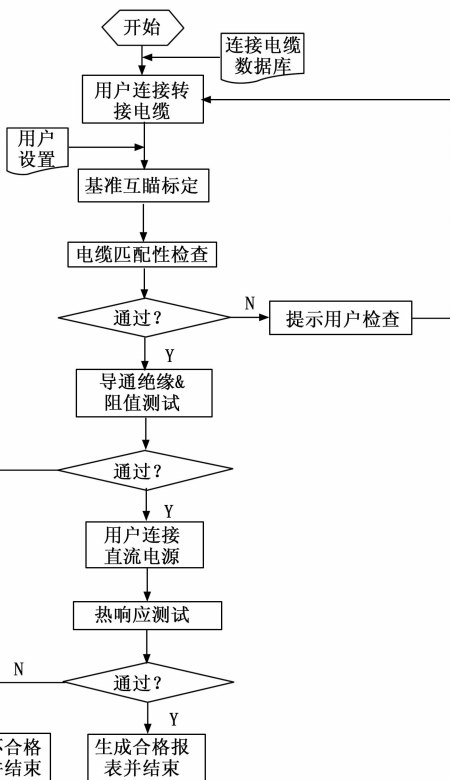


图 8 热响应自动化测试流程图

表 4 比较了手动标定的及系统自动测试的加热器回路连接关系及阻值结果, 由表中数据可知, 该系统对于回路节点连接关系识别准确无误, 阻值测量结果精确可靠, 与标定的阻值相对误差几乎可以忽略。

表 4 回路连接关系及阻值对比

节点连接关系		阻值/ Ω		阻值相对误差/ $\%$
标定	机测	标定	机测	
1,2	1,2	318.74	319.65	0.29
3,4	3,4	318.18	319.22	0.33
8,9	8,9	212.62	213.37	0.35
10,11	10,11	212.08	212.49	0.19
15,16	15,16	127.15	127.47	0.25

表 5 比较了手动标定及系统自动测试的热响应关系与设计输入的对比, 表中加热器名称及热敏电阻名称均为该元件在回路中的代号。由表中数据可知, 该系统对于回路节点连接关系识别准确无误。

表 5 热响应关系对比

加热器名称	设计响应热敏电阻	标定响应热敏电阻	机测响应热敏电阻
TX1	54 276	54 276	54 276
TX2	54 277	54 277	54 277
TR1	64 532	64 532	64 532
TR2	64 533	64 533	64 533
TR3	64 534	64 534	64 534

路连接关系及阻值测量, 需要两个熟练的测试人员近 40 分钟遍历完成; 回路中包含的 5 组热响应关系也需要近 45 分钟时完成。而自动化的测试系统完成第一项测试任务仅需约 5 分钟 (二分法测试时间与回路连接的密度有关, 越是稀疏连接时间越短), 第二项测试任务也仅需 20 分钟。

自动化测试系统仅需一人即可完成整个测试过程, 不仅可极大提高测试效率, 还可减少人工操作时引入的各项错误操作, 如数据记录及结果对比, 错检、漏检或重复检查等。特别是在热响应测试时, 自动化测试系统加热时每一处测温点的温度均可实时观察, 各项保护功能也使得测试过程更加安全。

5 结束语

卫星热响应测试系统集成了模块化的数字万用表, 矩阵开关及程控电源, 结合 LabVIEW 环境下开发的软件, 实现了卫星热控回路的热响应关系自动化测试。该系统具有自动化程度高, 使用灵活, 操作简单, 人机交互界面显示信息全面直观等优势。实际应用表明, 该系统可大幅提升测试效率, 节省人力资源, 在有效避免漏检及重复检查的同时得出准确可靠的测试结果, 具有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 徐福祥. 卫星工程概论 [M]. 北京: 宇航出版社, 2013.
- [2] 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.
- [3] 刘泽元, 冯 尧, 梁 硕, 等. 航天器热试验加热电缆绝缘自动测试系统的设计 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (9): 252-256.
- [4] 魏 鹏, 李志明, 郑丽得. 星上电缆自动导通绝缘测试仪的设计与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (10): 305-309.
- [5] 江 浩, 韦 笑, 汪新舜, 等. 星上热控回路阻值测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (1): 4-7.
- [6] 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.
- [7] 苏建军, 路林海, 吴明强, 等. 高压电缆测试仪的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (3): 438-440.
- [8] 宋宏江, 孟晓风, 王 琳. 高压电缆测试仪的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (2): 288-289.
- [9] 朱 熙, 韩 放, 申 彬, 等. 真空热试验温度参考点热响应测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 720-722.
- [10] 孙兴华, 韩 放, 裴一飞. 真空热试验热响应测试程序设计 [J]. 航天器环境工程, 2010, 27 (6): 288-290.
- [11] 陈树学, 刘 莹. LabVIEW 宝典 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [12] Travis J, Kring J. LabVIEW 大学实用教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [13] 戴鹏飞, 王胜开, 王格芳, 等. 测试工程与 LabVIEW 应用 [M]. 乔瑞萍译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [14] 丁 蔚, 彭 诚, 李 军, 等. 基于虚拟仪器面向对象编程技术的计量校准程序 [J]. 计量学报, 2019, 40 (6S): 69-74.
- [15] 王 洋, 魏洪峰, 姜明波, 等. 基于 LabVIEW 面向对象编程的温度自动检定校准系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (2): 54-56.

从测试时间来看, 30 个节点接插件接入 5 个负载的回