

星上热控回路阻值测试系统设计

江浩^{1,2}, 汪新舜², 韦笑², 宋歌²

(1. 上海卫星装备研究所, 上海 200240; 2. 上海裕达实业有限公司, 上海 200240)

摘要: 开发了一种基于虚拟仪器的星上热控回路阻值测试系统; 该系统在 NI PXI 硬件平台下集成了数字万用表和矩阵开关模块, 在 LabVIEW 平台下开发了测控软件; 系统通过控制开关切换实现了 120 个接入点的热控回路绝缘及阻值的快速自动测试, 同时具备测试数据管理、报表生成等功能, 与标定电阻的对比表明检测结果精确可靠, 相对误差小于 1%; 实际应用表明, 该系统集成度高, 使用灵活, 可极大提高检测效率, 节约时间约 80%, 具有较高工程应用价值。

关键词: 热控回路; 阻值测试; 虚拟仪器; 数字万用表

Resistance Measurement System Design for Satellite Thermal Control Circuit

Jiang Hao^{1,2}, Wang Xinshun², Wei Xiao², Song Ge²

(1. Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Yu Da Industrial Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: The design of a resistance measurement system for satellite thermal control circuit based on virtual instrument has been presented in this paper. The digital multi-meter and a matrix switch module are integrated in NI PXI platform, and the software is programmed in Labview development environment. The insulation and resistance measurement of satellite thermal control circuit which contains 120 access points can be implemented quickly and automatically through software controlled switch alternation. Data management and report generation function are also included. The measured results have been proved to be accurate and reliable through comparing with the calibrated resistance, the relative error is less than 1%. The system is highly integrated and flexible to use. It can improve the measurement efficiency, save about 80% test time, and has high application value.

Keywords: thermal control circuit; resistance measurement system; virtual instrument; digital multi-meter

0 引言

为了使卫星上的部组件的温度和温度梯度都保持在设计要求的范围内, 星上热控回路不可或缺。热控系统一般由被动元件和加热器, 恒温箱及热管组成。对于飞行任务复杂, 星体内部或外部热流变化大或温控要求很高的卫星, 必须在被动温控的基础上, 附加一些有效的主动温控方法, 如百叶窗, 电加热器, 相变材料及对流控制系统等^[1]。为保证热控回路工作达到预期效果, 必须在发射前对热控回路各连接点之间的导通、绝缘及阻值 3 个指标进行检查, 并与设计值比较判断热控回路是否满足设计需求。

对于含有 n 个连接点的回路, 如遍历检查各连接点之间的性能所需的测量次数为 $n * (n-1) / 2$ 。长期以来, 该项工作依靠人工操作电阻表/绝缘表完成, 不仅工作量十分庞大, 也容易出现漏检或重复检查等问题。为了提高测试效率, 自动化回路绝缘/阻值测试仪的开发得到广泛关注。苏建军等^[2-3]基于嵌入式计算机技术, 开发了小型、便携导弹电缆测试仪, 可以实现导弹电缆的导通测试和绝缘测抗电强度测试。宋宏江等^[4]开发了一种基于 PC104 总线数字式电缆测试仪, 实现了电缆导通电阻和绝缘电阻的自动测量。刘泽元^[5], 程海峰^[6]及魏鹏等^[7]分别根据任务需求开发了加

热电缆, 整星低频电缆网及星上电缆的导通绝缘自动测试仪, 提高了测试效率和准确度。

由于任务需求不同, 以上仪器设备基本为专用型仪器, 难以适用其它场合。本文根据航天八院卫星质量控制中热控回路阻值检测任务需求, 开发了一种基于虚拟仪器的自动化的星上热控回路阻值测试系统。通过在 NI PXI 硬件平台下集成模块化的数字万用表和矩阵开关, 并在 Labview 平台下开发测试软件, 可完成热电偶、电加热器及热敏电阻等元器件组成的回路阻值自动测试, 具有效率高、测试结果精度高、开发周期短等优点。

1 测试需求

航天器的热控回路测试系统应用对象包括热电偶、热敏电阻及加热器, 最大测试接出点数为 120 点, 不同的对象其测试要求也不相同。表 1 显示了各种不同测试对象的一些参数及要求。

表 1 测试需求表

测试对象	阻值范围/ Ω	绝缘判断/ $M\Omega$	插件件
热电偶	0~400	>20	Y2-36ZJ
			Y2-120ZJ
热敏电阻	0~80k	>20	Y2-50ZJ
			Y2-36ZJ
			Y2-50ZJ
加热器	0~1k	>20	Y2-36ZJ

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-07-30。

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

星上热控回路测试主要任务包括绝缘测试与电阻测试。绝缘测试时, 需将整星外壳和测试设备接插件外壳接地并分别定义为整星接地点和设备接地点, 检测待测对象回路各接出节点与上述接地点之间的绝缘特性。热电偶回路阻值测试需检测待测回路各接出节点与冰点之间的阻值; 热敏电阻、加热器阻值测试则需遍历检测回路所有接出节点之间的绝缘/连通特性, 筛选出连通的节点并测量阻值。测试结束后设备需将测试结果与热控回路阻值检查表相比较并判断是否合格, 同时设备还能按照给定格式生成报表。

2 测试原理及硬件设计

2.1 阻值测试原理

电阻测试可分为二线制和四线制, 其原理如图 1 所示。二线制方法激励电流流经导线 $R_{导线}$ 和待测电阻 R_{meas} , 测量设备通过导线测量电阻的电压并计算阻值。测量低阻值电阻时, 导线两端的压降等于 $I * (R_{导线} + R_{meas})$, 设备测量值并非电阻 R_{meas} 两端的电压。常规导线电阻值介于 $0.01 \sim 1 \Omega$ 之间, 当 R_{meas} 阻值小于 100Ω 时, 很难实现精确二线电阻测量。四线方法是用 4 条测试导线, 一对导线用于注入电流, 另一对待测电阻连接导线用于感应电阻 R_{meas} 两端的电压。由于待测电阻连接导线上无电流, 设备仅测量电阻两端的电压。四线制方法可消除内部测试导线产生的误差, 其精度高于二线方法, 常用于测量小于 100Ω 的电阻^[8]。

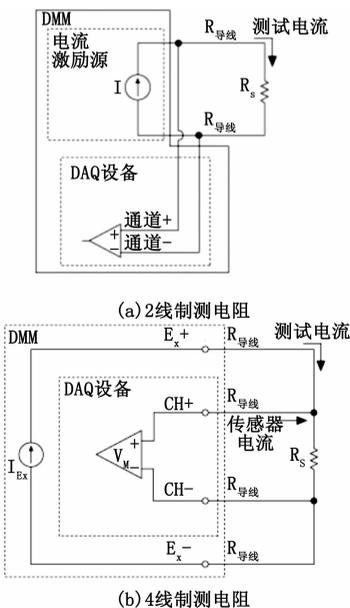


图 1 两种电阻测试方式

2.2 硬件设计

虚拟仪器 (Virtual instrument) 技术是一种利用高性能模块化硬件, 结合高效灵活的软件来完成各种测试、测量和自动化的应用技术, 具有开发周期短、通用程度高、部署方便灵活等优势^[9]。星上热控回路阻值测试系统基于 NI PXI 平台下的数字万用表+矩阵开关设计开发, 通过开关动作切换星上热控回路不同接入点至数字万用表构成待测回路并完成测量。设计时, 选用 NI PXI-1031 机箱作为

采集控制的硬件平台, 搭载 PXI-8820 嵌入式控制器、NI PXI-4070 六位半数字万用表和 PXI-2532B 矩阵开关。NI PXI-4070 电阻测试具有六档量程可调, 在二线制模式下最大量程可达 $100 \text{ M}\Omega$, 其在六位半精度下采样速率可达 100 S/s , 具有 $\pm 6 \text{ ppm VDC}$ 精度。同时, 该数字万用表在电阻测试时施加电压最大为 9 VDC , 满足星上电气安全要求。PXI-2532B 型矩阵开关具有一线 4×128 、 8×64 以及二线 16×32 、 4×64 、 8×32 、 16×16 六种配置模式, 其切换速度高达 2000 次/秒 并能与仪器同步运行。

根据实际接入点数及二线/四线测试方法的特点, 将 PXI-2572B 开关配置成 4×128 一线制矩阵。矩阵开关四根行线缆与数字万用表的 HI、LOW、HI SENSE 及 LOW SENSE 四个接头向连接。矩阵开关的 $1 \sim 120$ 号列线缆接头与机箱上的 Y2-120ZJ 航空插座相连接, $121 \sim 128$ 号接头与设备机箱专门设计的接线柱连接, 用于连接整星接地点、设备接地点。当列 1 行 1 及列 2 行 2 的开关关闭时, 构成了待测回路节点 1 和节点 2 之间二线制测电阻测试回路; 当列 1 与行 1 行 3、列 2 与行 2 行 4 的开关关闭时, 构成待测回路节点 1 和节点 2 之间四线制测电阻回路, 如图 2 所示。二线制工作模式下, 数字万用表量程大于 $20 \text{ M}\Omega$, 检测绝缘和连通; 四线制模式下, 精确检测连通节点对之间的电阻。这种接线方法充分考虑了二线制和四线制测试电阻的优点及绝缘和阻值测试要求。

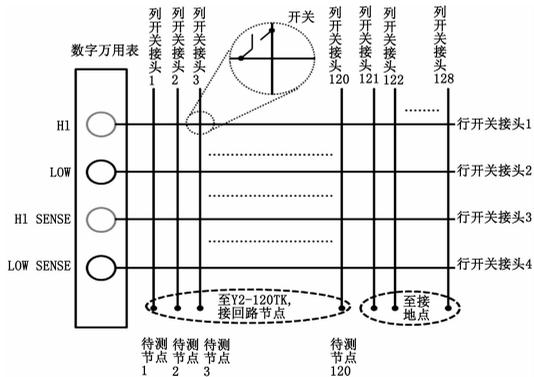


图 2 数字万用表-矩阵开关接线图

整个 PXI 机箱被安装在专门设计的铝合金箱体之中, 其内部留有空间存储转接电缆。机箱上表面安装有触摸屏供使用人员操作设备; 侧面安装有把手, 底部安装有滚轮, 方便在各个工位之间移动。整个设备具有较高的集成度及便携性, 使用简单方便, 如图 3 所示。实际测量时, 测试人员根据待测热控回路的接插件形式, 从 3 种不同规格的转接电缆 ($3 * \text{Y2-36TK} \sim \text{Y2-120TK}$; $2 * \text{Y2-50TK} \sim \text{Y2-120TK}$; $\text{Y2-120TK} \sim \text{Y2-120TK}$) 中选择合适规格, 将星上热控回路接插件接口与机箱上的 Y2-120ZJ 航空插座相连接。同时, 将星上接地点及设备接地点与设备的 $121 \sim 128$ 号接头相连接。这样就实现了数字万用表、矩阵开关和待测回路之间的连接。

3 软件结构及功能

测试软件部分基于 LabVIEW 开发, 它是美国国家仪器

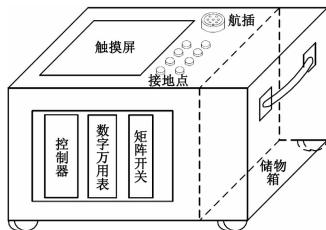


图 3 硬件框图

(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^[10]，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。

3.1 软件整体设计

星上热控回路阻值测试软件采用模块化编程，根据测试需求将软件分为测试配置、回路测试及数据管理三大模块，每个模块又分为若干个小的功能模块。这样设计既方便调试和修改，又可根据需求灵活组合适用于不同应用场合，如图 4 所示。

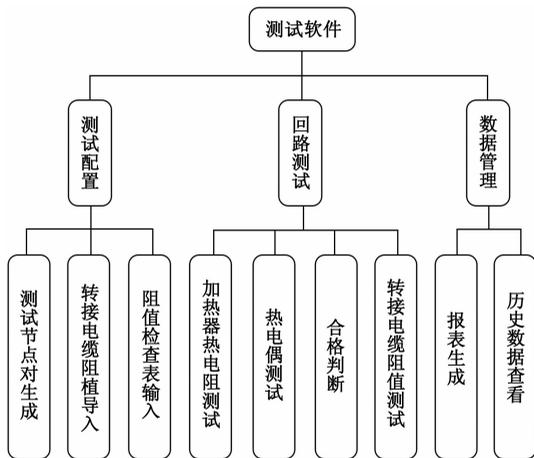


图 4 软件功能模块

图 5 所示为软件进行测试的运行流程图。从图中可以看到，测试系统的运行过程如下：用户进入软件，选择新建测试。新建测试可根据需求配置测试任务，配置结束后软件自动按照配置执行绝缘/连通检测、阻值检测并进行合格判断，检测结束后自动保存数据并生成报表。流程结束后，用户可以选择退出软件，也可继续进行下一次测试。软件的数据管理模块相对于测试过程独立，用户可以在进入软件时直接调用该模块的功能如查看历史数据等。用户也可以根据实际需要在数据管理模块和回路阻值测试模块之间相互切换，方便使用。

在软件设计中采用生产者-消费者架构满足程序功能设计的要求，这是一种多线程编程中最基本的设计模式，是事件处理器和队列消息处理器相结合而构成的复合设计模式。如图 6 所示，上方循环为生产者循环，在生产者循环中采用事件结构，处理热控回路阻值测试软件中各种人机交互事件，如执行测试配置、执行电阻测试等；消费者则负责处理生产者发布的这些事件任务。

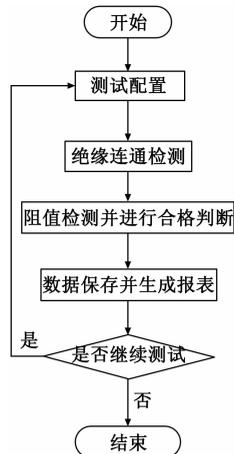


图 5 软件流程图

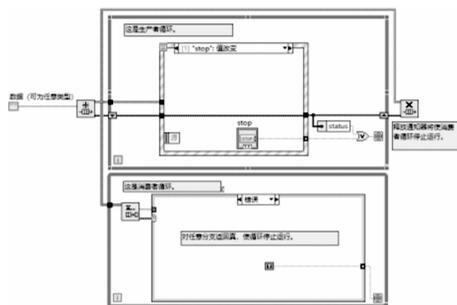


图 6 生产者消费者架构程序框图

3.2 测试配置

测试配置模块供用户输入测试必须的配置信息。对于热敏电阻/加热器回路测试，用户需输入待测热控回路节点信息、卫星接地点、设备接地点，填入后测试配置模块将生成所有节点之间的遍历待测节点对以及所有节点与接地点之间待测节点对。对于热电偶回路测试，还需要输入冰点，填入后程序将生成所有节点与冰点及接地点之间的待测节点对。虽然四线制方法可以消除测试回路内部导线阻值，然而在测试过程中使用了转接电缆，其阻值也是待测回路阻值的一部分。因此，程序内置了不同型号的转接电缆阻值数据库，用户可在设置界面选择相应的数据文件以消除转接电缆阻值对测试结果的影响。在测试配置界面，用户还可输入正确的阻值检查表，以供程序判断回路是否满足设计需求。检查表可以以手动输入的方式在软件界面录入，也可以导入指定格式的 Excel 表格。此外，所有的设置内容均可保存为文件，用户可直接加载已保存的设置，进行批次测量无须重复输入。

3.3 回路测试

回路测试模块主要执行绝缘和阻值测试。软件首先自动将数字万用表量程设定为 100 MΩ，根据用户测试配置控制开关动作进行二线制绝缘检测，超过 20 MΩ 判定为绝缘并生成绝缘节点对；小于 20 MΩ 则判断为连通并生成连通节点对。

绝缘检测完成后，用户可设定量程范围保持在“Au-

to”, 也可根据绝缘检测结果设置量程。软件对连通节点对重新采用四线制方法测试阻值, 并从测试结果中自动减去测试配置模块中用户选择的连接电缆阻值, 可极大提高测试结果的准确性。由于实际测试中, 用户可能制作新的转接电缆, 回路测试模块还可通过短接的方法测试转接电缆的阻值, 生成转接电缆阻值文件并保存, 供用户使用。

测试结束后, 软件将绝缘节点对、连通节点对阻值以表格形式显示在软件主界面, 同时与用户配置模块中输入的阻值检查表相比较并判断热控回路是否满足设计需求, 对于不满足需求的测试结果予以高亮红色显示, 方便检测人员二次排查, 如图 7 所示。

定好阻值的星上热控回路网进行了测试。结果表明, 该系统对于回路节点之间绝缘/连通关系识别准确无误。表 3 比较了部分标定值和系统的测试结果, 由表 3 可知, 阻值测试结果与标定值非常接近, 误差几乎可以忽略。

表 3 标定阻值与测试阻值

标定阻值/ Ω	测试阻值/ Ω	相对误差/(%)
101.732	101.988	0.25
211.433	211.745	0.14
309.211	309.729	0.17
53.563	53.874	0.58

从实际测试时间来看, 100 个节点的热敏电阻/加热器回路遍历测量, 需要两个熟练的质量检验人员接近 3 个小时才可完成测量和合格检查; 使用该设备仅需一人操作, 并在 40 分钟之内完成自动测量、合格性检查, 生成报表。由于设备对于回路连通及阻值检查全自动化, 可完全避免人工检查中易出现的避免漏检及重复检查。同时, 该设备操作简单方便, 检测人员经过半天左右培训即可掌握并使用, 与培养熟练的手工质量检验人员相比可节约大量培训时间。

5 结束语

星上热控回路绝缘阻值测试系统采用模块化设计, 通过 NI-PXI 平台下集成的高精度数字万用表和矩阵开关, 结合 LabVIEW 环境下开发的软件, 实现了对热敏电阻/加热器以及热电偶阻值的快速准确测量。该系统具有使用方便灵活、开发周期短等优点。实际应用表明, 该系统可实现多种规格热控回路阻值自动测试, 大幅提升测试效率, 节约人力资源; 设备检测结果准确可靠, 避免重复检查或漏检, 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] 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.
- [3] 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.
- [4] 宋宏江, 孟晓凤, 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 (3): 288-290.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 申忠如, 郭福田, 丁晖. 电气测量技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [9] 周冀馨, 孙博玲. 虚拟仪器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [10] 陈树学, 刘莹. LabVIEW 宝典 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.

图 7 测试结果显示

3.4 数据管理

软件的数据管理功能可生成测试结果报表并调取历史数据查看。报表有 word 和 Excel 两种格式, 如图 8 所示。

测试报告

测试者: *** 测试时间: ****年**月**日 测试结论: **

来源 pin	去向 pin	电阻 (Ω)	来源 pin	去向 pin	阻值 (Ω)
1 ^o	2 ^o	17.135 ^o	5 ^o	6 ^o	17.378 ^o
3 ^o	4 ^o	17.339 ^o	7 ^o	8 ^o	17.2 ^o

注: 除连通节点对以外, 其余节点之间的阻值均大于 20M Ω , 详细节点对数据见测试软件输出的 Excel 表格。

来源pin	去向pin	阻值 ($M\Omega$)
1	100	>20
2	100	>20
3	100	>20

图 8 测试报表

Word 格式报表包含了测试者、测试时间、测试结论以及连通节点对的测试阻值, 供用户打印; Excel 格式则额外包含了绝缘节点对。这是因为当热敏电阻/加热器遍历测量时, 虽然实际测试的节点对高达数千对, 但连通节点对一般只有数十至一百余对。由于软件 Word 格式报表采用逐行写入的方法生成, 若将所有结果写入过于消耗时间; Excel 格式报表则可以一次性写入。这样不仅可以节省时间, 也保留了全部原始数据。

除了 Word 格式和 Excel 格式报表, 软件的数据管理模块还将所有历史测试结果、用户配置文件以及转接电缆阻值均保存为 TDMS 格式文件, 用户可以直接通过软件调取和查询这些数据, 方便人工复检。

4 试验对比分析

为检验系统检验电阻的准确性, 将该系统连接到已标