

基于磁感原理的非接触多通道电流测试仪的设计与验证^{*}

严 嵘^{1,2} 林佳伟^{1,2} 季 业^{1,2} 卢德清¹ 张德明^{1,2} 崔 振^{1,2}

(1.北京控制工程研究所 北京 100190; 2.空间智能控制技术重点实验室 北京 100094)

摘 要: 功率环和信号环的电流检测是太阳帆板驱动机构的重要测试项目。现有检测方法对 SADA 电流回路进行接触式检测,若检测设备故障或者人员操作不当会对 SADA 造成损伤。为了避免损伤,基于霍尔效应设计了一种非接触式多通道电流测试仪,可以在不接触被测目标的情况下,对 SADA 功率环和信号环中电流进行有效测量,检测精度优于 0.2%。与原有检测方法的对比试验表明,两种方法对 SADA 信号环和功率环的相对误差均在 0.1%之内。可见,该仪器测量精度足以有效满足 SADA 信号环和功率环的测试需求,其优点在于降低检测过程中产品损坏的风险。

关键词: 磁感;非接触;多通道;电流测试仪;设计;验证

中图分类号: V441 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.3

Design and verification of non-contact multi-channel current tester based on magnetic induction principle

Yan Rong^{1,2} Lin Jiawei^{1,2} Ji Ye^{1,2} Lu Deqing¹ Zhang Deming^{1,2} Cui Zhen^{1,2}

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;

2. Science and Technology on Space Intelligent Control Laboratory, Beijing 100094, China)

Abstract: The current detection of the power loop and the signal loop is an important test item for the solar array driving mechanism (SADA). Existing detection methods perform contact detection on the SADA current loop. If the detection equipment fails or the personnel operate improperly, it will cause damage to the SADA. In order to avoid damage, a non-contact multi-channel current tester is designed based on the Hall effect, which can effectively measure the current in the SADA power loop and signal loop without touching the target under test, and the detection accuracy is better than 0.2%. The comparison test with the original detection method shows that the relative errors of the two methods for the SADA signal loop and power loop are both within 0.1%. It can be seen that the measurement accuracy of this instrument is sufficient to effectively meet the test requirements of the SADA signal loop and power loop, and its advantage is to reduce the risk of product damage during the detection process.

Keywords: magnetic induction principle; non-contact; multi-channel; current tester; design; verification

0 引 言

太阳帆板驱动机构(solar array drive assembly, SADA)是卫星控制系统的关键部件,在卫星能源获取有着至关重要的作用^[1-3]。SADA 一旦发生故障,将严重影响卫星在轨稳定运行,甚至危及卫星安全。多年的实践和研究发现,SADA 故障的有几个主要方面:磨屑及多余物导致短路或卡死,轴系周向及轴向温度分布不均导致卡死,润滑失效导致卡死等。SADA 功率环和信号环的特征物理量为电

流,短路和卡死问题将直接反应在电流值,所以 SADA 电流测试是确保卫星在轨正常工作的重要测试项目。

现有检测方法有两种:一种是将 SADA 功率环和信号环采用转接电缆转接到转接盒,直接使用电流表测量;另一种方法是使用现有的电流测试仪,该仪器基于运算放大器的并联电路组合进行电流测量^[4-6]。文献[7]针对电容式微机械超声换能器高灵敏度、宽频带的特点以及微弱电流检测的需求,设计了一种高增益、宽频带的三级放大电路,实现对微弱电流信号的检测、放大以及滤波功能。文献[8]提

收稿日期:2021-06-14

^{*} 基金项目:装备预研基金(6140004030202)、北斗卫星导航系统重大专项(GFZX0305030112)项目资助

出一种基于 ARM 的负序电流检测仪,保证了测量的精度。文献[9]对于集磁环的存在导致开环式和闭环式霍尔效应传感器存在磁饱和现象,提出一种由多个霍尔元件构成圆形阵列方式的传感器阵列电流测量系统,通过测量一次导线产生的磁场,计算得到被测电流数值。文献[10]研究了一种应用于智能电网的高压直流电流及谐波电流测量方法。以上各种方法均对于产品的安全及检测过程规范提出了高要求和新的尝试。文献[11]针对高重频脉冲功率电源放电异常的现象,设计了基于 CAN 总线的对脉冲电源模块充放电以及数据采集的分布式控制及在线电流检测装置。

现有检测方法需要在 SADA 功率环和信号环中串联或并联检测设备,检测设备故障或操作失误就有可能昂贵的 SADA 产品造成伤害。此时,SADA 电流检测不仅没有提高 SADA 产品的安全性,反而造成惨重的经济损失。为了提高 SADA 测试的安全性,本文设计了一种非接触型多通道电流测试仪,为 SADA 功率环和信号环电流检测提供一种新的方案。

1 基础知识

太阳帆板驱动机构如图 1 所示,它用于驱动太阳帆板以巡航、增量、保持和归零方式以顺时针或者逆时针方向转动,从而使太阳帆板对准太阳,保证卫星的能源供应。太阳帆板驱动机构采用导电滑环进行太阳帆板与卫星内部电力系统的电能传输。

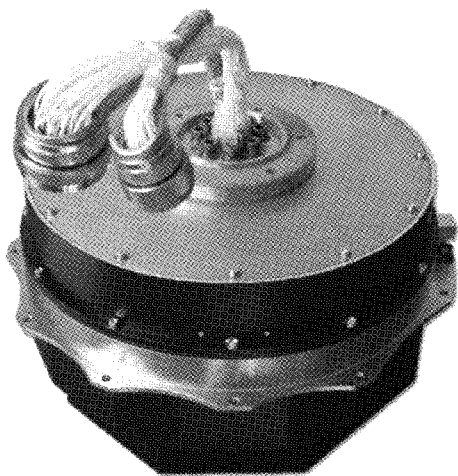


图 1 太阳帆板驱动机构

在 SADA 的研制过程中,需要多次对 SADA 的功率环和信号环电流进行检测。传统的检测方法如图 2 所示。先使用转接电缆将功率环信号从接插件引出到转接盒,再使用万用表对转接盒上检测点进行检测。其缺点是检测过程中需要接触被检测的电路,一方面改变了电路参数从而影响检测真实性,另一方面容易引入风险从而影响检测安全性。

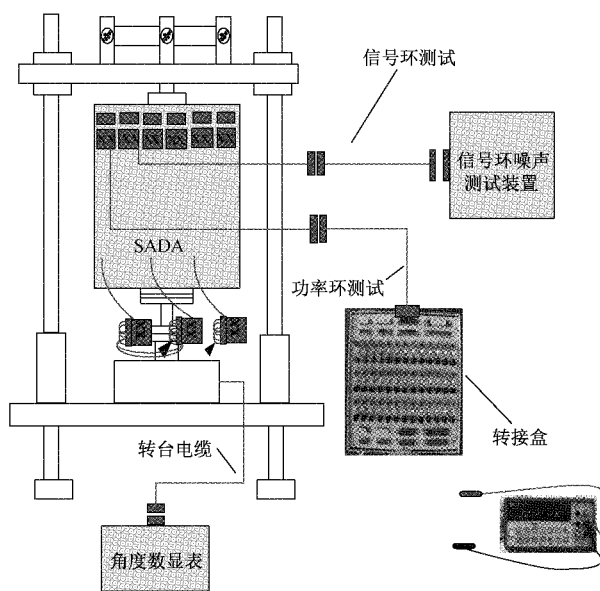


图 2 检测方法示意图

2 系统方案设计

多通道电流测试仪专门为测量 SADA 功率环和信号环的电流检测而设计。该仪器的可以测量 24 路线缆中通过的电流,在测量电流的同时不会对被检测的 SADA 产生影响。系统方案设计时需要考虑多通道并行测试功能^[12-13]和测试可视化界面^[14]。

系统方案设计的基本思路是使用霍尔电流传感器进行非接触式电流检测。霍尔电流传感器的工作原理是霍尔效应。由于通电线圈内部存在磁场,其大小与导线中的电流成正比,可以利用霍尔传感器测量出磁场,从而确定导线中电流的大小。利用这一原理设计制成霍尔电流传感器,其优点是不与被测电路发生电接触,不影响被测电路,不消耗被测电源的功率,特别适合于有严格安全要求,非接触式的电流测量^[15]。

霍尔电流传感器工作原理如图 3 所示,标准圆环铁芯有一个缺口,将霍尔传感器插入缺口中,圆环上绕有线圈,当电流通过线圈时产生磁场,则霍尔传感器产生信号输出。文献[16]是霍尔传感器的具体应用。

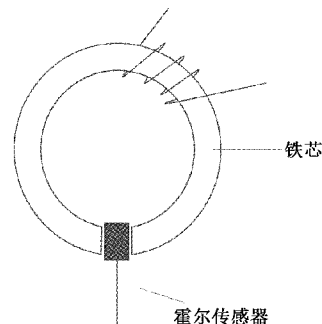


图 3 霍尔电流传感器工作原理

为了实现上述设计思路,系统主要包含如下两部分:

1) 存储显示工控机:它是非接触多通道电流测试仪的上位机,内含监视程序,可以控制电流测试仪完成对被测 SADA 机构的滑环电流监视显示和监视数据存储。它可以保存被测线路上电流的变化情况,根据设置完成数据的输出、记录等工作,便于后续的数据分析。

2) 非接触多通道电流测试仪本体:它包含功率电源、电流采集模块、电流互感模块、通信转化模块,这些模块共同组合完成对 SADA 机构的电流检测功能。非接触多通道电流测试仪采用标准工控机箱,测量范围 0~10 A,测量最大允许误差优于 $\pm 0.5\%$ 。

系统框架如图 4 所示,将 SADA 系统中的待测电流信号通过转接电缆连接到多通道电流测试仪,然后使用霍尔电流传感器进行电流检测,并送往工控机进行数据存储。注意到图 4 所示检测系统与图 2 有着本质的区别:

1) 图 4 方法仅进行电缆的转接,并不需要将电缆中的某个具体信号引出到转接盒,操作简单,不会引入安全风险。

2) 图 4 方法仅延长了 SADA 系统的电缆,对 SADA 系统并无实质性改变,而图 2 方法将检测设备连接入 SADA 系统的电路中。

3) 图 4 方法使用霍尔电流传感器进行非接触式电流检

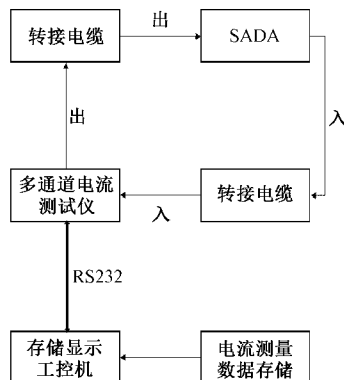


图 4 系统框图

测,而图 2 使用万用表等检测仪器进行接触式电流检测。

通过分布在多通道电流测试仪前面板上的信号输入插座、输出插座、开关和测试端子,对被测设备的电流进行精确的测量。机箱前面板安装 SADA 产品通用接插件,负责待测电缆与转接电缆相连后的标准接口。同时,安装 (62×2) 个选择跳线孔配选通开关,并安装 (24×2) 个对应内部 24 路电流测试单元的跳线孔,负责待测电缆中任意一根电线测试的选通,整个测试设备亦可以视为一个电缆中电线分线器。其后面板外形如图 5 所示。

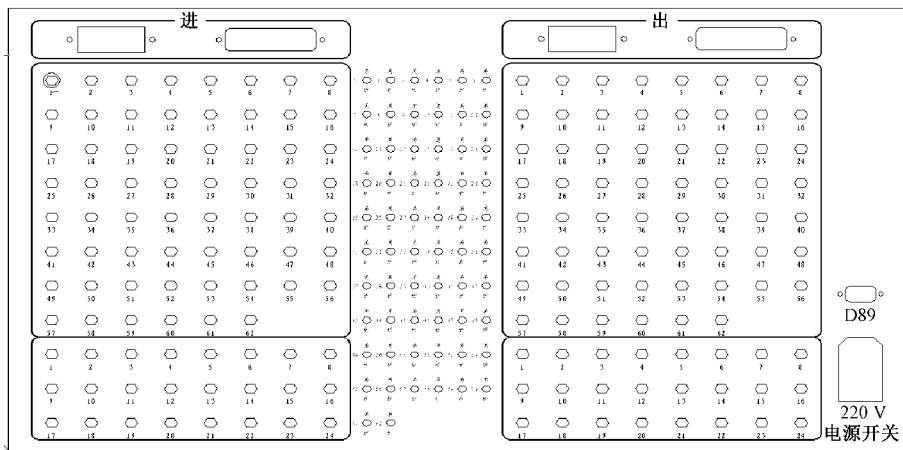


图 5 多通道电流测试仪后面外形板图

3 硬件设计

多通道电流测试仪的硬件系统由测试计算机、测试设备箱两部分组成,如图 6 所示。

测试设备箱内部安装了 24 块电流传感器、3 块 +20 mA 电流采集模块、1 块通信转换模块、3 块低纹波开关电源、2 个散热风扇等器件,是测试设备的核心部分。

1) 电流传感器

电流传感器利用霍尔原理测量磁场,确定导线中电流的大小。如图 7 所示为霍尔电流传感器电路连接图,按照图示箭头方向,将待测电线穿过即可进行测量。

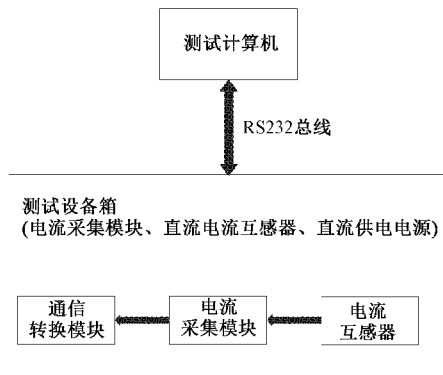


图 6 电流测试设备结构框图

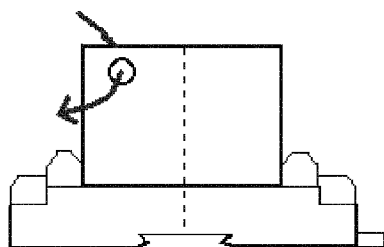


图 7 霍尔电流传感器电路连接图

2) 电流采集模块

电流采集模块采用 16 位高精度 A/D 转换,负责接收电流传感器输出的电流信号,将电流信号送到测试计算机,再由测试计算机中的组态软件进行转换输出为测量信号。

3) 通信转换模块

通信转换模块主要负责将所有的 485 采集模块的信号转换为 232 通信信号,将数据传送到测试计算机的通信口。AC/DC 电源板将交流 220 V 电压转换成直流电源, +15 V 的直流稳压电源为霍尔传感器供电,24 V 为采集模块和通信模块供电。测试计算机上运行组态软件能够接收测试数据,将测试结果实时存入数据库中,可以根据需要修改数据的存储间隔,并将数据转存到 excel 报表中,所有的测试结果全部记录到测试计算机的硬盘上,采集模块由一个 ATmega32 单片机控制。

4 软件设计

多通道电流测试仪的软件由测试计算机的测试程序和测量单片机测试程序两部分组成,单片机内部的测试程序能实时接收测试计算机的命令,根据命令把电流测量结果实时传送给单片机。测试计算机测试程序利用成熟的工控组态软件,完成界面友好的人机交互式程序,能够发送测试命令、接受测量数据,并把测试结果实时存入数据库并将数据保存到 excel 报表中,便于数据的统计分析。利用测试程序可以方便地同时测量多达 24 路被测电流信号,利用软件的灵活性,可以修正硬件测量原理中的不足,大大提高了测量精度。测试计算机程序显示界面,如图 8 所示。

5 调试校准和验证

5.1 调试校准

测量仪表的调试校准具有重要的意义^[17]。对多通道电流测试仪功能、性能的有效性进行两个方面的验证,第 1 个方面是电流测量精度测试,以考查仪器线性误差是否满足要求;第 2 个方面是电流测量的长时间稳定性测试,考查仪器稳定性误差是否满足要求。

被校对象:多通道电流测试仪。任务书要求技术指标:范围 0~1 A(小量程)、0~10 A(大量程),准确度±0.2%。

校准所用仪器:多功能校准仪(型号:M-140,出厂编

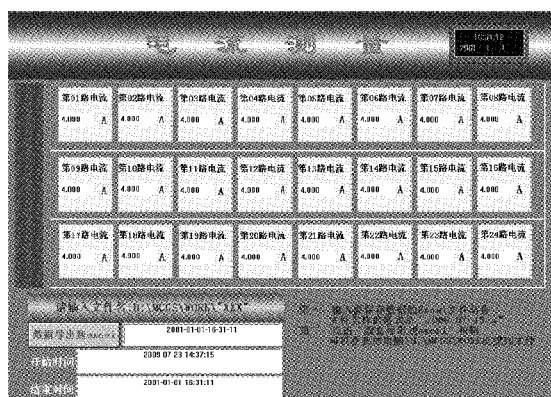


图 8 测试计算机测试程序人机界面

号:411871,厂家:MEATEST)。

环境条件:实验室温度 25.3℃、相对湿度 40%。

M-140 输出直流电流范围:0~20 A,准确度±0.01%,因此,选择仪器 M-140 完全符合量值传递要求,能完成多通道电流测试仪的精确测量。

进行电流测量精度测试时,对多通道电压采集板卡第 1 通道进行校准,分别设置 M-140 输出电流标准值为 0.1、0.5、1、5、10 A,记录设备显示的测量值。电流误差采用如下公式计算:

$$\text{电流误差} = (\text{电流显示值} - \text{电流标准值}) / \text{量程}$$

用同样的方法校准其余通道。

实测部分数据如表 1 所示。由表 1 可知,误差在±0.2%内,仪器准确度符合要求。

表 1 电流测量精度测试

通道号	标准值/A	显示值/A	误差/%
1	0.100	0.101	0.100
1	0.500	0.500	0.000
1	1.000	1.000	0.000
1	5.000	5.001	0.010
1	10.000	10.000	0.000
2	0.100	0.102	0.200
2	0.500	0.499	-0.100
2	1.000	1.000	0.000
2	5.000	5.001	0.010
2	10.000	10.000	0.000
3	0.100	0.101	0.100
3	0.500	0.500	0.000
3	1.000	1.000	0.000
3	5.000	5.001	0.010
3	10.000	10.000	0.000
...	...	...	...
24	0.100	0.101	0.100
24	0.500	0.500	0.000
24	1.000	1.000	0.000
24	5.000	5.001	0.010
24	10.000	10.001	0.010

进行电流测量的稳定性测试时,M-140 输出 0.5 A,分别加在多通道电流测试仪各个通道,每个通道使用计算机记录一周数据(每 2 min 记录一次)。使用每个通道的测量电流的最大值和最小值,计算电流测量的稳定性误差。电流误差采用如下公式计算:

$$\text{电流误差} = (\text{电流最大值} - \text{电流最小值}) / \text{量程}$$

实测部分数据如表 2 所示。

表 2 电流测量稳定性测试

通道号	标准值/A	显示值/A	误差/%
1	0.5	0.498	-0.2
1	0.5	0.499	-0.1
1	0.5	0.500	0
1	0.5	0.500	0
1	0.5	0.501	0.1
1	0.5	0.501	0.1
1	0.5	0.502	0.2

由表 2 可知,稳定性误差为 0.4%。经过查询资料和实践检验,造成检测结果误差由 0.2% 上升到 0.4% 的根本原因是霍尔器件对温度的敏感性。多通道电流测试仪通电 10 h 后测量数据会有 0.002~0.004 A 的漂移。后续试验表明,测试的环境温度的一致和通风都对测试结果有良好的改善。为了保证测试箱内部温度的一致性,在测试箱侧壁装两个散热风扇,保证了空气的良好流通。同时,使用环境温度应保持在 20℃~25℃,该环境有利于电流测试仪的长时间使用。如果长期在恒温 20℃ 空调房间内使用,电流稳定性测试结果误差会减小。

5.2 对比验证

试验对象编号为 X 的 SADA,试验室稳定温度 25℃、湿度 40%,使用下面两种测试方法对 SADA 功率环和信号环电流进行测试,并对比结果。

方法 A 对 SADA 功率环和信号环电流按照图 2 所示方法进行检测,记录数据为“功率环 A”和“信号环 A”。

方法 B 使用多通道电流测试仪对 SADA 功率环进行检测,检测数据为“功率环 B”和“信号环 B”。两种测试方法对比结果如表 3 所示。

表 3 两种测试结果对比

通道号	功率环 A	功率环 B	信号环 A	信号环 B
2	3.001	3.000	0.201	0.200
9	3.000	3.000	0.201	0.201
11	3.000	3.000	0.201	0.201
16	3.000	3.000	0.201	0.201
20	3.000	3.000	0.201	0.200

经过对比试验结果表明,在对同一被测对象进行检测

过程中,A 方法与 B 方法对 SADA 信号环测量误差在 0.1% 之内,对 SADA 功率环测量误差在 0.1% 之内,结果一致。

6 结 论

本文介绍了一款基于霍尔电流传感器的多通道电流测试仪的设计方案,用于对卫星上的 SADA 电流信号环及功率环中的电流进行测试。具有精度高、易携带、不会对被测对象 SADA 产生影响的特点。方案采用不接触式的设计,安全系数高,可有效避免因地面测试设备故障或测试人员操作失误导致的卫星上设备损毁。该多通道电流测试仪不仅可以对 SADA 进行专项检测,还可以通过与不同接插件型号的转接电缆的匹配,从而推广到其他被测产品的电流测试中。

参考文献

- [1] GAN L P, PANG Y L, QIANG X, et al. Fuzzy criticality assessment of FMECA for the SADA based on modified FWGM algorithm & centroid defuzzification [C]. International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering(ICQR2MSE 2011),2011.
- [2] 李彦锋,黄洪钟,黄意贤,等. 太阳翼驱动机构的故障模式影响分析与时变可靠性研究[J]. 机械工程学报, 2020,56(5):108-115.
- [3] 吴正婕. 太阳帆板驱动机构内导电环磨屑颗粒运动迁移特性分析[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [4] 刘育芳. 小议泄漏电流测试仪及相关标准[J]. 电子测试, 2020(16): 90-92.
- [5] 刘浩,项琼,汪泉,等. JJG1069-2011《直流分流器》检定规程解读[J]. 中国计量,2012(2):125-127.
- [6] 王文昌,张济麟. 直流分流器与直流分压器结构原理及现场应用分析[J]. 计算技术与自动化,2012(2): 45-49.
- [7] 陈谋,何常德,张文栋,等. CMUT 电流信号的转化放大与滤波电路设计[J]. 仪表技术与传感器,2020(8):48-52,56.
- [8] 刘健,安永丽,史彩娟,等. 基于 ARM 的负序电流监测仪的设计与实现[J]. 电测与仪表,2012, 49(11): 65-70.
- [9] 项琼,岳长喜,胡琛,等. 基于霍尔传感器阵列的电流测量系统[J]. 电测与仪表,2017, 54(23):105-110.
- [10] 李振华,胡廷和,李春燕,等. 应用于智能电网的高压直流电流及谐波测量方法研究[J]. 中国科学, 2019, 49(11):1361-1371.
- [11] 李捷,罗红娥,顾金良,等. 脉冲功率源控制及在线电流检测技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(5): 73-77.
- [12] 黄威,毛开,赵子坤,等. 可扩展多输入多输出信道高效

- 模拟器研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 1-8.
- [13] 渐欢, 全大英, 侯晓宇, 等. 多通道高速信号采集器[J]. 仪表技术与传感器, 2020(11): 44-49.
- [14] 王生龙, 景博, 焦晓璇, 等. 测试性设计策略优化与建模的可视化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 109-115.
- [15] 梁献国. 电机测试仪中非接触技术的设计与应用研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2019, 3(6): 82-85.
- [16] 谢君, 李德才, 朱锐棋. 霍尔式磁性液体微压差传感器的设计及特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 27-34.
- [17] 胡伟伟. 一种大电流测试设备校准仪设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.

作者简介

严嵘, 高级工程师, 主要研究方向为仪器与测试技术、北斗导航卫星控制分系统设计等。
E-mail: 13718565272@139.com