

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208804

一种高精度电流测量电路的设计与应用

侯秀林 张永乐 张 楷

(北京航天万源科技有限公司 北京 100176)

摘要: 为了满足测量系统供配电控制设备实时监测输出电压与输出电流的需求,本文设计了一种高精度电流测量电路,该电路基于TI公司的精密电流监测计INA260芯片设计,实现了对0~36 V供电范围内的0~15 A持续电流实时监测和精确测量。电流测量值通过I²C接口输出,信号测量电路同数字控制电路实现电气隔离。通过大量数据测试,输出电压实测值与理论值间误差范围在0~10 mV,输出电流实测值与理论值间误差范围在0~5 mA。实验结果表明,该电路对0~15 A内的电流测量精度和0~36 V内的电压测量精度均优于1%,实现了实时监测的功能,并提高了测量精度。

关键词: 电流测量;高精度;INA260;隔离

中图分类号: TN792 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Design and application of a high precision current measuring circuit

Hou Xiulin Zhang Yongle Zhang Kai

(Beijing Aerospace Wanyuan Science & Technology Corporation, Beijing 100176, China)

Abstract: In order to meet the requirements of real-time monitoring output voltage and output current of power supply and distribution control equipment of measurement system. This paper designs a high-precision current measurement circuit, which is based on TI's precision current monitor INA260, which can realize real-time monitoring and accurate measurement of 0~15 A continuous current in the 0~36 V power supply range. The current measurement value is output through the I²C interface, and the signal measurement circuit is electrically isolated from the digital control circuit. Through a large number of data tests, the error range between the measured output voltage and the theoretical value is 0~10 mV, and the error range between the measured output current and the theoretical value is 0~5 mA. The experimental results show that the application circuit's current measurement accuracy within 0~15 A and voltage measurement accuracy within 0~36 V are better than 1%, realizing the function of real-time monitoring and improving the measuring precision.

Keywords: current measurement; high-precision; INA260; isolated

0 引 言

在航天测控领域,供配电控制设备一般作为一种中间装置,连接地面电源与箭上设备(或弹上设备),配电控制设备的主要功能是通过接收控制指令分别对箭上设备进行供电分配,同时实时监测输出电压与输出电流。实际应用中由于供电支路较多,若使用传统的直接测量法测量电流,一方面测量的精度较低,另一方面在PCB布局时,占用面积较大且设计复杂。因此设计一种高精度、运行稳定且占用PCB面积较少的测量电路非常必要。

国内对于电流监测技术理论和应用展开研究技术较为成熟,比如谢完成等^[1]提出了一种基于霍尔传感器的电流

测量方法;鲁丽彬^[2]设计了一种用于电池管理的高精度电流传感器;李非凡等^[3]提出了一种基于三轴隧道磁阻阵列的电流传感器及其测量方法;关静等^[4]设计了基于INA193的电源电流高精度测定方法。

近年来,国外厂家推出了一些高精度电流感测芯片用于电流监测,如MAX4173、LT1787、INA193、HV7800、AD8210等,这些芯片体积小,内部集成高精度分流电阻,运放电路、ADC电路等,大大降低了设计难度。

在已有技术基础上,本着易实现、高精度、高可靠性的原则进行设计,本文选用INA260电流感测芯片,用于供配电控制设备的电流测量,克服了传统测量方法的弊端,具有较强的实用价值。

收稿日期:2022-01-08

1 应用背景

供电系统一般由地面电源、配电控制设备和负载设备 3 部分组成^[3-7],示意图如图 1 所示。其中配电控制设备内部共 13 个配电支路,各配电支路相互独立。地面电源供电输出电压范围为 DC24~32 V,负载设备共 13 路,每路电流均在 0.3~13 A 范围内。配电控制设备的功能是通过接收控制中心发送的控制指令,根据指令将地面电源供电信号分别输出至各路负载设备,同时对输出的电压和电流进行实时监测,并将监测数据通过网口实时上报给控制中心。配电控制设备内部的控制电路采用电磁继电器实现通断切换,测量电路即为本文所述的电流测量电路。

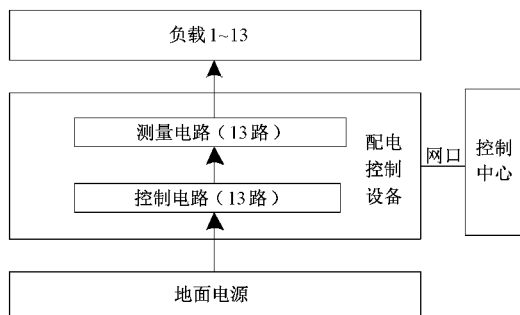


图 1 供电系统应用框图

2 功能实现

2.1 电流测量方案

测量电流最常用的方法是直接测量法,在电路中串接高精度电阻器(分流器),通过采集电阻器两端的压降,再根据欧姆定律 $I=U/R$ 得到电流值。采集分流器两端的电压需要通过模数转换器,将电压值量化成数字量值,在应用软件中还原成电流值。这种测量电路一般包括分流电阻、运放电路、ADC 采样电路,需要的器件较多,而且对分流电阻的精度要求也很高,在 PCB 设计时需要考虑运放电路和 ADC 电路的布局 and 连接路径等,设计复杂度较大,而且占用空间较大,对本文要求的多路同时测量的应用需求不适用。

本文采用的方案是使用 TI 公司的高精度电流感测芯片 INA260,该芯片内部集成分流电阻,运放电路、ADC 电路,可大大降低设计复杂度,且对于电流测量精度影响较大的因素如分流电阻的参数值和温度系数、分流电阻与运放电路、ADC 的连接路径以及 ADC 的采样精度,都进行了有效的控制。INA260 的内部原理如图 2 所示,由 4 部分组成,分别为精密内阻, V/I 切换开关,运放采集电路和数字接口。工作原理是:外部输入电流流经精密电阻后转换为电压,由内部 ADC 电路进行模数转换,转换后的数字量通过 I²C 数字接口输出,INA260 对电流和电压测量通过内部 V/I 切换开关进行切换。

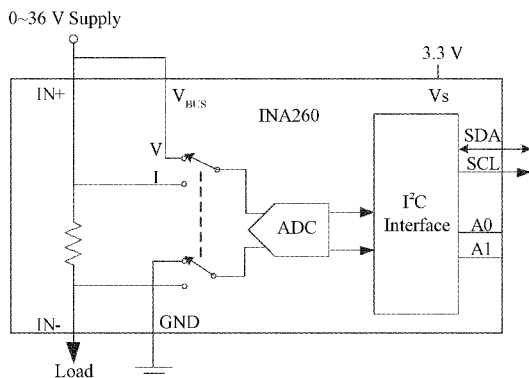


图 2 INA260 内部原理

INA260 可测量的最大电压是 36 V,最大测量电流 15 A,内部集成 16 位精密 ADC,最大测量增益误差为系统总增益误差,常温(25 °C)条件下误差仅为 0.15%,在 -40 °C~125 °C 的温度范围内最大也仅为 0.5%,供电由 2.7~5.5 V 单电源供电,供电电流在 5 V 条件下仅为 310 μA。INA260 采用 16 脚 TSSOP 小型封装,大小仅为 5 mm×4.4 mm,内部集成 I²C 数字接口,方便进行扩展与级联。

2.2 测量电路设计

测量电路示意图如图 3 所示。图中,U1 为电流感测器 INA260,U2 为 I²C 接口隔离器 ADM3260,U3 为 I²C 主控制器。U1 用于电流和电压测量,U2 为 I²C 总线接口隔离器,对由 U1 构成的测量电路和 U3 的 I²C 数字接口电路进行电气隔离,U2 可提供 3.3 V 隔离电压用于 U1 供电;U3 为 I²C 总线控制器,常用单片机、DSP 或 FPGA 等器件均可实现此功能。

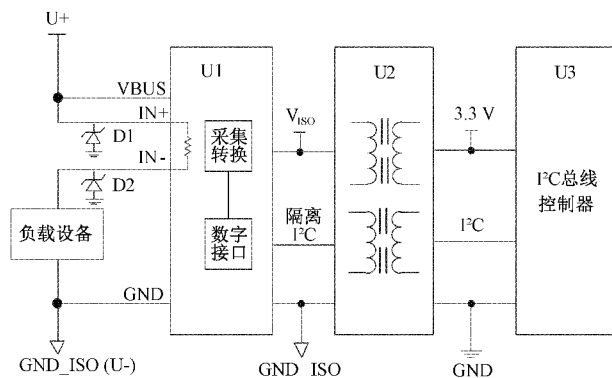


图 3 测量电路框图

图 3 中,3.3 V 和 GND 为测量电路供电输入, V_{ISO} 和 GND_ISO 为隔离 3.3 V 电源,U1 的 VBUS 管脚直接接到 U+,用于电压检测,U+ 和 U- 分别为被测输入电压正和负,U- 与 GND_ISO 共地,IN+ 和 IN- 分别为电流入和出。由于 INA260 的电流为双向,可测试正负电流,IN+ 和 IN- 为双向管脚,电流可从 IN- 入 IN+ 出,此时 VBUS 应连接到正电压端,VBUS 不可连接负电压,否则会烧坏芯片,在测量负电流时需要注意 VBUS 管脚的连接。

测量原理:图3中U+提供的电流从IN+端入,经过U1的内部集成电阻后从IN-出,后流经负载再到供电负端U-端(GND_ISO),U1通过内部精密电阻感测电流,通过VBUS端监测电压,经内部运算放大和模数转换后,实时将转换结果通过I²C接口发送到U2,经U2数字隔离后,由U3通过I²C接口读取转换数据。

2.3 电流感测方式选择

INA260作为电流感应器,在测量电流时有两种方式,分别为低侧感测和高侧感测两种^[8-12],低侧感测方式如图4(a)所示,感测电阻放在负载和接地端之间;高侧感测方式如图4(b)所示,感测电阻放在电源和负载之间。

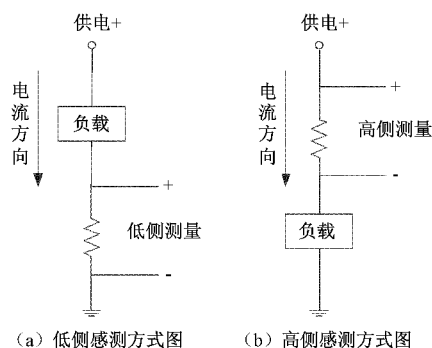


图4 低侧测量和高侧测量对比图

两种感测方式在使用上各有利弊,低侧感测的优势在于电流测量输入端的共模电压非常低,接近于零,不足之处在于负载的负端并不是系统地。而高侧感测的优势是负载的负端即为电源地,也是系统地,与之交互的系统可统一使用一个接地端作为基准,不足之处是共模电压较高,接近于电源电压,易受干扰。在本文的应用中,地面电源提供的多路供电信号是共地的,且负载设备与配电设备也共地,综合比较,采用高侧感测方式,采用高侧感测后所有负载设备的供电负端即为公共地,也是地面电源的供电负端。

2.4 数字隔离设计

在实际的工程应用中,供电U+从INA260的IN-一端到负载终端,中间的距离很长,在复杂的电磁环境下,供电线上的噪声干扰较大,为防止此干扰影响后续电路,为提高后续数字电路的抗干扰性及稳定性,需要对前级供电及测量电路和后续数字电路做隔离保护^[13-14],在I²C接口处将I²C控制电路与INA260测量电路进行隔离。

本电路使用I²C接口隔离器进行隔离,隔离后INA260供电地(GND_ISO)与系统的3.3V供电地(GND)完全隔离,INA260供电3.3V由I²C接口隔离器提供。I²C接口隔离器采用ADI公司芯片级数字隔离器ADM3260,采用isoPower[®]技术,内部集成隔离式DC-DC转换器,可同时提供电源供电隔离和数字电平隔离。

ADM3260接口电路如图5所示。工作电压范围2.7~5.5V,隔离V_{ISO}输出电压由VSEL管脚调节,输出电压公式如式(1)所示。

$$V_{ISO} = \frac{1.23 \times (R_{up} + R_{down})}{R_{down}} \quad (1)$$

上拉电阻取 $R_{up} = 16.9 \text{ k}\Omega$,下拉电阻取 $R_{down} = 10 \text{ k}\Omega$,V_{ISO}输出3.3V电压。ADM3260提供的I²C接口均为双向接口,即图5中原边接口(SCL1所在边)和副边接口(SCL2所在边)均可作为主控制器端。ADM3260的V_{ISO}输出电压可提供最大为30mA输出电流,而INA260单片工作电流不大于0.5mA,13支芯片同时由ADM3260供电,功率满足要求。

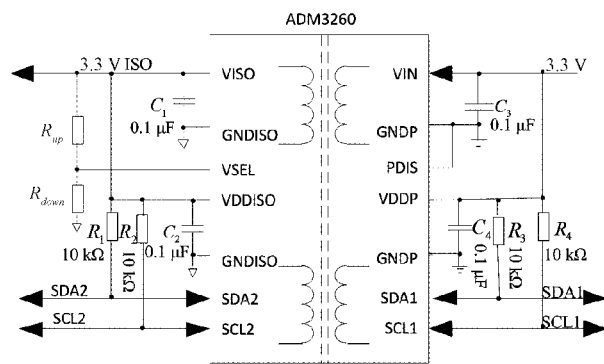


图5 ADM3260接口图

3 逻辑控制

INA260数据通信接口采用I²C总线通信。I²C总线^[15-16]是一种简单、双向的同步串行总线,可以使用多个主机控制一个或多个从机,由于I²C在通信时无片选线,因此需要主机通过寻址模式确认从机的地址,主机在通信时将地址发送到总线上,每个从机将该地址与自身地址进行比较,如果匹配,则在SDA线上发送一个低电平(称为ACK位),如不匹配,则SDA保持高电平。

INA260在使用时只能作为从器件,具体工作模式在芯片每次上电后由I²C主控制器通过软件设定。I²C从器件的地址一般通过A0和A1地址管脚进行配置,为便于扩展,INA260的A0和A1管脚分别连接到芯片的GND、VS、SCL和SDA端可组合出16个从地址。因此每个I²C总线可最多连接16片INA260。本文电流测量共需13路,使用从器件地址1000000~10001100。

I²C总线主器件使用FPGA实现,示意图如图6所示。内部I²C主控模块控制从器件的读写操作。在电路上电后,I²C主控模块通过I²C接口对13片INA260的内部寄存器进行配置,配置完成后,按照设定的读取速率从13片INA260中循环读取转换数据,然后将数据进行打包处理,通过网络通信接口上报到控制端。

INA260的配置内容主要包括取平均点数、转换时间及测量模式。INA260内部集成求取平均值及功率计算功能,不仅可直接读取经过取平均后的电压和电流值,而且可直接读取功率值(单位为W)。求平均的样本点数可设置

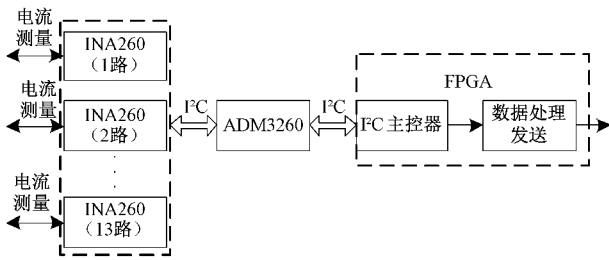


图 6 逻辑控制框图

从 1~1 024 个点,共 8 个档位。

电压转换时间和电流转换时间均可以设置从最小 160 μ s 到最大 8.244 ms,共 8 个档位。工作模式可选择连续测量、触发测量和掉电模式。具体设置值分别如表 1 所示,配置值均为二进制。

表 1 INA260 寄存器配置

代号	配置值	备注
AVG	011	取平均值点数:64
VBUSCT	100	电压转换时间:1.1 ms
ISHCT	100	电流转换时间:1.1 ms
MODE	111	电压和电流连续测量模式

表 1 中关于取平均点数和转换时间的设定方法:本文在实际项目中要求每 100 ms 上报一次测量数据,因此设定取平均点数与转换时间的乘积控制在 100 ms 内即可,本文选择 64 个取平均值点数,转换时间设定为 1.1 ms,满足使用要求。

另外,主机可通过阈值寄存器设定电压和电流报警阈值,超出阈值后输出报警信号,由芯片的 ALERT 管脚输出,输出形式为 OC 门。

4 测试验证

INA260 内部集成 16 位 ADC,绝对最大输入电压 40.96 V,电压仅能测试正电压,转换值只输出正值,共 32 767 个 LSB,每个 LSB 大小为 40.96 V/32 767=1.25 mV。电流输出可为正、负值,负电流编码值按二进制补码形式输出,电流输出值每个 LSB 大小固定为 1.25 mA,功率值均为正值输出,即使电流值为负值,每个 LSB 固定为 10 mW。

4.1 电压测试

测试方法示意图如图 7 所示。测试输入电压使用安捷伦 34450A 型台式 5 位半高精度万用表,正表笔在靠近测量电路的 IN+ 端口测试,负表笔接在直流电源的 V- 接线柱上。电子负载调节到定电阻模式(CR 模式),电阻值设定为 2.8 k Ω 。

以配电控制设备测量电路的一路为例,按照图 7 所示的电压测量示意图搭建测试环境,如图 8 所示。图中测试电压使用福禄克 8808A 型台式 5 位半高精度万用表,28 V



图 7 电压测量示意图

供电输入使用艾德克斯 IT6333A 型稳压电源,电子负载使用艾德克斯 IT8812 型。



图 8 电压测量实物图

输入电压选取 0.5~36 V 共 14 组数据进行测试,结果如表 2 所示。表中,输入电压为直流电源供电电压,为万用表实测值;测量电压由 INA260 转换后的数字量换算得到,转换关系如式(2)所示。

$$V_{test} = Data \times 1.25 \text{ mV} \quad (2)$$

式中,Data 为 INA260 转换后输出的数字量值。

表 2 电压测试结果

输入电压/ V	Data (十进制)	测量电压/ V	测量误差/ mV
35.996	28 803	36.004	8
32.998	26 404	33.005	7
29.998	24 003	30.004	6
26.999	21 604	27.005	6
23.999	19 204	24.005	6
20.999	16 803	21.004	5
18.000	14 404	18.005	5
14.999	12 003	15.004	5
11.999	9 601	12.001	2
8.999	7 201	9.001	2
5.999	4 800	6.000	1
1.999	1 600	2.000	1
0.999	800	1.000	1
0.499	401	0.501	2

从表 2 可看出,在 0.5~36 V 电压区间共测试了 14 组电压值,测量值中最大的误差也仅为 8 mV,最小仅为 1 mV,整个测量区间电压测量精度达到了 8 mV/36 V=0.22%,该精度满足系统需求。

4.2 电流测试

测试方法示意图如图 9 所示。测试输入电流采用与测

试输入电压同型号的万用表。电子负载调节到定电流模式(CC模式)。直流电源输出电压值设定为28V。

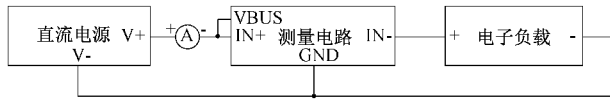


图9 电流测量示意图

以配电控制设备测量电路的一路为例,按照图9所示的电流测量示意图搭建测试环境,如图10所示。图中测试电压使用福禄克8808A型台式5位半高精度万用表,28V供电输入使用艾德克斯IT6333A型稳压电源,电子负载使用艾德克斯IT8812型。

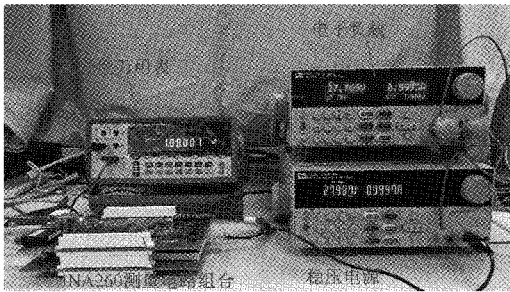


图10 电压测量实物图

输入电流选取0~15A共17组数据进行测试,测试结果如表3所示。表中,输入电流为万用表实测值;测量电流是由INA260转换的数字量值换算得到,转换关系如式(3)所示。

$$I_{\text{test}} = \text{Data} \times 1.25 \text{ mA} \quad (3)$$

式中:Data是INA260转换后的输出的数字量值。

表3 电流测试结果

输入电流/ A	Data (十进制)	测量电流/ A	测量误差/ mA
0.099	80	0.100	1
0.499	400	0.500	1
0.999	800	1.000	1
1.999	1 600	2.000	1
3.000	2 401	3.001	1
4.000	3 201	4.001	1
5.000	3 999	4.999	1
6.001	4 800	6.000	1
7.001	5 600	7.000	1
8.001	6 400	8.000	1
9.001	7 199	8.999	2
10.000	7 998	9.998	2
11.001	8 800	11.000	1
12.002	9 600	12.000	2
13.002	10 400	13.000	2
14.002	11 200	14.000	2
15.001	11 999	14.999	3

从表3可看出,在15A量程范围内共测试了17组数据,电流测量误差最大仅3mA,测量误差非常小,整个电流范围内总体测量精度为3mA/15A=0.2%,该精度满足系统需求。

5 结 论

本文提供了一种高精度电流测量电路,该电路基于电流感测器INA260设计,INA260内部集成精密分流电阻和模数转换器,不仅可以减小PCB面积和降低系统复杂度,而且提供了极高的测量精度;电路采用隔离器对电流感测电路和控制电路进行了电气隔离,提高了电路的抗干扰性能,保障在前端的测量电路发生故障时不会影响到控制电路。经过实际验证和考核,该测量电路在0~36V和0~15A范围内的电压和电流测量精度均优于1%,工作稳定可靠,性能满足系统需求。该测量电路简单实用,测量精度极高,具有非常高的应用价值。

参考文献

- [1] 谢完成,戴瑜兴.一种新的基于霍尔传感器的电流测量方法[J].电子测量与仪器学报,2012,26(8):705-710.
- [2] 鲁丽彬.一种用于电池管理的高精度电流传感器设计与实现[J].电子器件,2017,40(4):946-952.
- [3] 李非凡,冀永芳,吴强,等.基于三轴隧道磁阻阵列的电流传感器及其测量方法[J].电子测量技术,2021,44(18):54-60.
- [4] 关静,胡圣尧,杨子立,等.基于INA193的电源电流高精度测定方法研究与实践[J].电子测量技术,2019,42(12):76-80.
- [5] 李朝凤,姚静波,辛朝军.基于麒麟操作系统的运载火箭地面测试系统设计[J].计算机测量与控制,2018,26(1):11-13,46.
- [6] 赵岩,杨友超,张翔,等.航天器高可靠智能供配电系统设计[J].计算机测量与控制,2015,23(8):2776-2778,2781.
- [7] 朱源,韩峰,杨超.运载火箭上面级供配电一体化设计[J].现代防御技术,2017,45(6):38-43,53.
- [8] 周峰,李鹤,李文婷,等.大电流测量传感技术综述[J].高电压技术,2021,47(6):1905-1920.
- [9] 施政远,徐雁,李文婷,等.便携式冲击电流测量装置的设计及测试[J].仪表技术与传感器,2021,(10):42-46.
- [10] 高国旺,侯大森,余大伟,等.基于FPGA的多参数测量系统的设计[J].国外电子测量技术,2020,39(4):110-114.
- [11] TANAKA T, NISHIDA Y, FUNABIKI S. A method of compensating harmonic currents generated by consumer electronic equipment using the correlation

- function[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1):266-271.
- [12] LEE C F, MOK P. On-chip current sensing technique for CMOS monolithic switch-mode power converters [C]. IEEE International Symposium on Circuits & Systems, IEEE, 2002.
- [13] 张本云, 谢雪松, 张小玲, 等. 一种隔离型数据采集系统的设计与实现[J]. 测控技术, 2014, 33(11):57-59.
- [14] 王丽蓉, 任勇峰, 刘东海, 等. 多通道隔离采集电路设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(14):153-157.
- [15] 陈兴龙, 唐海, 任鹏, 等. 基于 FPGA 的 I²C 总线设计与应用[J]. 电子科学技术, 2016(3):195-199.
- [16] 许智豪, 李维波, 华逸飞, 等. I²C 总线技术在舰船能量管理系统 I/O 端口扩展中的应用[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(1):144-149.

作者简介

候秀林, 工程师, 主要研究方向为电路与系统。

E-mail:btbul994@163.com

张永乐, 高工, 主要研究方向为测量系统供配电控制。

E-mail:634374592@qq.com

张锴, 工程师, 主要研究方向为测量系统供配电控制。

E-mail:478910536@qq.com