

基于罗氏线圈的室内电源负载电流检测电路设计

王鹏宇, 王勤

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要:通过分析罗氏线圈的测量原理,设计了一款作为电流互感器的罗氏线圈及其信号调理电路,用以实时测量室内电源的负载电流。该罗氏线圈采用塑料圆环作骨架和漆包铜线为绕线,信号调理电路采用由新型低噪声的 OPA 211 构成的二级精密运算放大电路,其中,第一级运算放大电路将罗氏线圈感应出来的毫伏级电压信号加以放大,第二级运算放大电路采用钽电容作为积分元件,用以还原被测电流和对产生的干扰噪声信号进行滤波。实验结果表明:该罗氏线圈及其信号调理电路具有线性度好、测量精度高、制造成本低等优点,满足 0.5 级电流互感器工频电流测量要求,具有工程应用意义。

关键词:罗氏线圈;信号调理电路;干扰噪声;电流互感器;电源负荷

中图分类号:TM835.4

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0059-03

罗氏线圈(Rogowski Coil)作为一种新型电子式电流互感器测量传感头,主要特点是被测电流与线圈无直接接触,具有测量范围宽、无磁饱和、体积小等优点,在电力系统等领域具有广阔的应用前景,已成为新世纪互感器发展的重要方向之一^[1-2]。文献[3]设计了一款测量精度达到 0.2 级的罗氏线圈,具有线性度好、无磁饱和、测量频率范围宽、结构简单等性能特点,适应于电力系统在线测量、数字化继保、控制、故障诊断及电力系统光纤网的应用需求;文献[4]选用自积分式罗氏线圈测量系统,构建了反映 RSD 开关的放电电流试验平台,能有效提高测量高速大功率 RSD 开关状态电流的快速性、准确性和可靠性;文献[5]设计了一款既能准确测量稳态电流,又能很好反映故障电流暂态性能的罗氏线圈传感头;文献[6]设计了一种基于罗氏线圈的电子式电流互感器,能有效减小罗氏线圈的测量误差,并基于该线圈设计出由模拟积分器构成的电流互感器和采用 DSP 芯片的数字输出电子式电流互感器,测量精度达到 0.5 级。文中针对高校学生宿舍和实验室电器火灾隐患源安全用电监控装置的研发要求,设计了一款基于罗氏线圈的室内电源负载电流检测电路^[7]。罗氏线圈的设计采用塑料圆环作骨架和漆包铜线为绕线,信号调理电路采用由新型低噪声的 OPA 211 构成的二级精密运算放大电路,不仅可以将罗氏线圈感应出的毫伏级电压信号加以放大,而且还可以对罗氏线圈产生的干扰噪声信号进行滤波,能快速准确地在线检测室内电器设备的用电状态,测量电流范围为 0~20 A。

1 室内电源负载电流检测电路设计

文中设计的室内电源负载电流检测电路如图 1 所示,由罗氏线圈及其调理电路两部分组成,线圈套

在被测线路上(无电气接触),线圈两端连接至调理电路,调理电路用于将罗氏线圈感应出的被测电源负载电流 I_x 转换成便于采集的输出电压信号 V_o 。

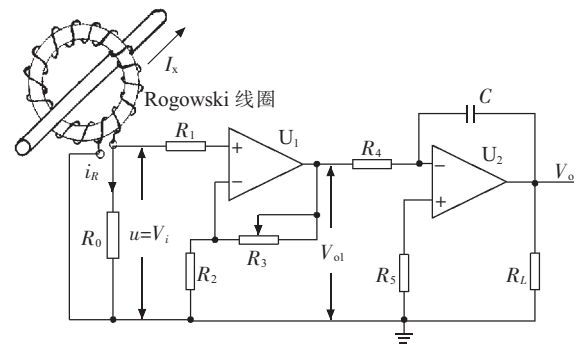


图 1 室内电源负载电流检测电路

1.1 罗氏线圈测量原理

罗氏线圈的工作原理是将导线绕制在非磁性环形骨架上,测量时将载流导线从线圈中心穿过,被测电流与线圈不直接接触。根据安培环路定律和电磁感应定律,磁场将在线圈两端产生一个感应电动势,其大小正比于被测电流 I_x 对时间的微分,测量精度可设计到高于 0.1%,一般为 1%~3%^[1,2]。由于罗氏线圈是一种特殊结构的空心线圈,不含铁心,不存在磁饱和问题,也不存在动力和热力的稳定问题,因此,几乎不受被测电流大小的限制,且因被测电流所产生的磁场变化而感应出相应电势,本身并不与被测电流回路存在直接联系,其测量电流的范围可以由几安培到几千安培,频率范围可设计到 0.1 Hz 至 1 MHz,特殊的可设计到 200 MHz,并且可以测量其他技术受限制领域的小电流^[3]。

文中设计的罗氏线圈采用塑料圆环作骨架、漆包铜线为绕线,在一根截面细且均匀的绝缘管上,均匀密绕线圈,并将此线圈的两头紧密相吻合而成为螺线管线圈。在测量电流时,将此线圈围绕载有被测电流 I_x 的导体,运用电磁场分析方法和全电流定律,磁场强度 \vec{H} 沿

任意封闭轮廓的线积分等于穿过该封闭轮廓所限定面的电流, $I_x = \oint \vec{H} d\vec{l}$, 可得螺线管所交链的磁链 ψ 为:

$$\psi = n_0 \mu_0 s \oint \vec{H} d\vec{l} = n_0 \mu_0 s I_x \quad (1)$$

式中: n_0 为螺线管单位长度上的线圈匝数; μ_0 为真空磁导率; s 为管内均匀磁场中一平面的面积; \vec{l} 为线圈圆管上任一线元。由式(1)可见, 当螺旋管线圈中心线直径比线圈直径大得多时, 线圈所交链的磁链 ψ 与被测电流 I_x 存在线性关系。

1.2 调理电路设计

从图 1 中不难看出, 当穿过测量线圈(即螺线管)限定面的电流 I_x 发生变化时, 测量线圈所交链的磁链也随之变化, 所产生的感应电流 i_r 通过取样电阻 R_0 转化为感应电压 $u = V_i$, 这部分实际上为一微分环节。因此, 要反映实际被测电流 I_x 的大小, 就必须加一积分环节, 首先将感应电压 u 作为集成运放 U_1 的输入电压 V_i , 经集成运放 U_1 放大为 V_{o1} , 再送入由集成运放 U_2 组成的积分电路。利用运放“虚地”概念, 可推导出输出电压 V_o 为:

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{1}{R_4 C} \int V_{o1} dt \\ &= \frac{1}{R_4 C} \int A_{v1} \frac{dI_x}{dt} dt \\ &= \frac{1}{R_4 C} n_0 \mu_0 s A_{v1} I_x \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A_{v1} 为第一级同相运算放大器 U_1 的放大倍数, $A_{v1} = 1 + R_3/R_2$, 可以通过调节可变电阻 R_3 来选取合适的数值。

U_2 为反相积分器, 通过对上述罗氏线圈输出电压 V_{o1} 积分, 可方便地还原出被测电流 I_x 。使用电压表测量积分器的输出电压 V_o , 可得到被测电流 I_x 的大小, 以及所设计罗氏线圈及其调理电路在整个测量范围内的误差。

由于罗氏线圈感应出来的是毫伏级电压信号, 在放大微弱信号的场合, 放大器自身的噪声对信号的干扰会比较严重, 为减小这种噪声, 采用了低噪声运放作输入级, 以提高第一级放大器的输出信噪比。文中采用德州仪器(TI)新推的 OPA211 作输入级, 它是一款将超低噪声和更低功耗、更小封装尺寸和更高带宽结合起来的精密运算放大器, 噪声电压为 1.1 nV/Hz(在 1 kHz 时), 偏移电压为 100 μ V, 增益带宽为 80 MHz。

积分电路是一个非常重要的环节, 文中采用钽电容作为积分元件, 电路的准确性能保证测量的精度, 并能减少后续电路的误差, 电容的存在还可以对产生的干扰噪声信号进行有效滤波。

2 实验结果及分析

为验证如图所 1 示的以塑料圆环作骨架和漆包铜线为绕线罗氏线圈及其调理电路的有效性, 开展了一系列实验测试研究工作。

图 2 示出了该罗氏线圈电流与调理电路积分输出电压间的 $U-I$ 特性, 可调被测电流 I_x 在 0~5 A 范围, 所测出的相应调理电路的积分输出电压 V_o 与被测电流 I_x 具有理想的线性关系。从理论上讲, 设计的罗氏线圈及其调理电路的测量电流范围可达到 0~20 A。

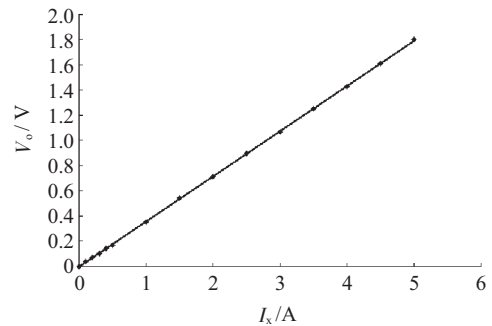


图 2 罗氏线圈及其调理电路 $U-I$ 特性

图 3 示出了该罗氏线圈及其调理电路的动态响应性能, 通过突然施加一工频被测交流电流信号 I_x , 可以看出调理电路的积分输出电压 V_o 。在很短的时间内就能达到稳态特性。

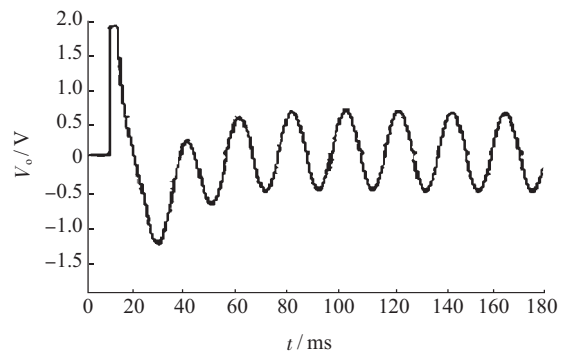


图 3 罗氏线圈检测到的瞬变电流波形

图 4 示出了所设计罗氏线圈检测到的工频感应电流信号 i_r 经取样电阻输出的电压信号 V_i , 可以明显看出输出信号中混杂了罗氏线圈产生的干扰噪声信号。进一步地, 图 5 和图 6 示出了积分电容为 $C = 0.1 \mu$ F 和 $C = 1 \mu$ F 的调理电路对罗氏线圈检测电流信号 i_r 经放大和滤波后产生的积分输出电压信号 V_o , 可见电容的容量大小对波形平滑是有一定的影响。选择图 6 所示较大的积分电容, 能够有效地消除输出信号中的谐波成分, 从而提高调理电路的输出电压信号品质。

3 现场测试

应用所研发的罗氏线圈电流传感器, 对实验室电

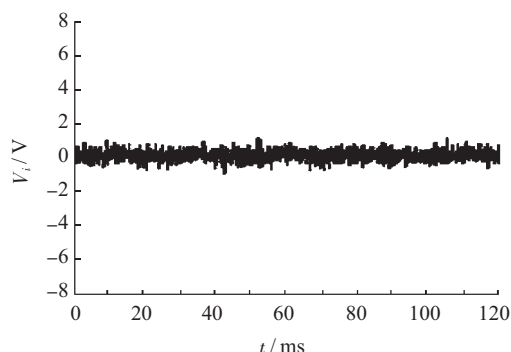
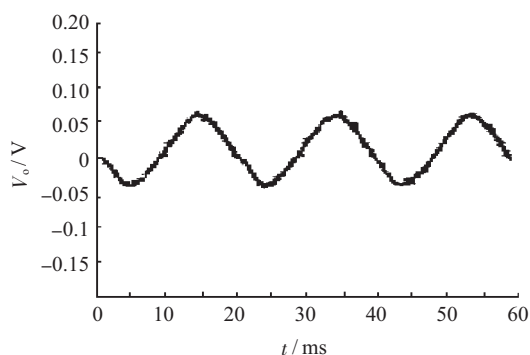
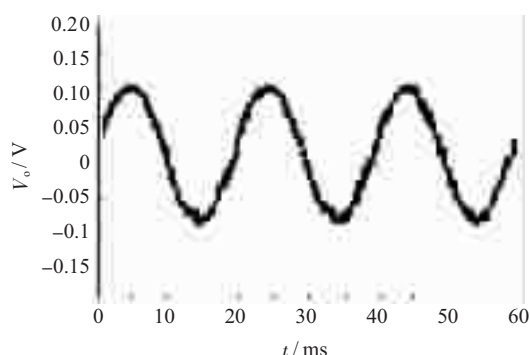


图4 罗氏线圈产生的干扰噪声信号

图5 积分电容 $C=0.1 \mu\text{f}$ 的调理电路输出电压波形图6 积分电容 $C=1 \mu\text{f}$ 的调理电路输出电压波形

源负载电流进行了实测研究工作,将罗氏线圈直接套在室内电源系统的出线上,与被测电源线路相间隔开,

不存在直接电的联系。实验室中运行的电器设备是台数不等的计算机,积分电路输出电压 V_o 的数值能准确反映不同台数运行计算机的电源负载电流。

4 结束语

文中设计的基于罗氏线圈的室内电源负荷检测电路能够准确、可靠地完成对电载荷的测量,具有线性度好、测量精度高、测量范围宽、制造成本低等优点,满足0.5级电流互感器工频电流测量要求,易于模块化和工业化生产,还可进一步进行数字化和智能化扩展。该罗氏线圈传感器已成功应用于一种室内电器安全用电监控装置的研发,为智能建筑领域的室内电器用电安全监控提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 李维波,毛承雄,陆继明. 新型磁位计在线检测技术研究[J]. 传感技术,2001,20(11):14-17.
- [2] AMBOZ R, MACHINABAL-JOHN D. Rogowski Coil Design and Calibration [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 45(2): 511-515.
- [3] 赵玉富,叶妙元,贺志容,等. 用 Rogowski 线圈测量微小电流[J]. 高电压技术,2004,30(7):9-10.
- [4] 李维波,毛承雄,余岳辉,等. 罗氏线圈在高速大功率电流检测系统中的特性研究[J]. 电工技术学报,2006,21(6):49-53.
- [5] 郑慧,陈明军,黄飞腾. 电子式电流互感器中 Rogowski 线圈的设计及动静态性能分析[J]. 仪表技术,2008(12):56-58.
- [6] 司小平,乐丽琴,赵国生. 罗氏线圈电子式电流互感器的设计[J]. 电子设计工程,2013,21(21):144-147.
- [7] 王鹏宇,王勤,戴文婧,李荃. 室内电器安全用电监控装置及其监控方法[P]. 中国发明专利,申请号:201410111244.7,2014.4.

作者简介:

王鹏宇(1994),男,江苏南京人,本科在读,从事电气工程及其自动化专业相关研究。

王勤(1967),男,江苏南京人,教授,博导,从事功率电子变换技术、新能源发电技术等研究工作。

Rogowski Coil based Current Measuring Circuit Design for Indoor Power Supply Loads

WANG Pengyu, WANG Qin

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

Abstract: By analyzing the measuring principle of Rogowski coil, a new current transducer with the Rogowski coil is proposed for on-line measuring indoor power supply load currents. The Rogowski coil is designed with plastic ring and enamel-insulated copper wire, which are used as its framework and winding wire, respectively, and the signal processing circuit is designed with two precise operating amplifiers by employing OPA 211 with low noise. Amongst, the first amplifier serves to amplify the inducted millivolt signal from the Rogowski coil, while the second amplifier serves to restore the measured current signal and filter the yielded interrupt noise signal. The experiment results show that the proposed Rogowski coil and its signal processing circuit has merits of good linearity, high measuring precision and low manufacturing cost, which meets the measuring requirement of industry frequency current transducer with 0.5 grade and has important engineering application value.

Key words: rogowski coil; signal processing circuit; interrupt noise; current transducer; power supply load