

文章编号:1001-1609(2002)03-0019-04

# 基于 Rogowski 线圈电流传感器的研制

翟小社<sup>1</sup>, 王颖<sup>2</sup>, 林莘<sup>1</sup>

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023; 2. 河北省计量科学研究院, 河北 石家庄 050031)

## THE DEVELOPMENT OF CURRENT TRANSDUCER BASED ON THE ROGOWSKI COIL

ZHAI Xiao-she<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, LIN Xin<sup>1</sup>

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China;

2. Hebei Province Academy of Metrological Science, Shijiazhuang 050031, China)

**摘要:** 论述了 Rogowski 线圈电流传感器的系统结构、工作原理、制作工艺等环节。对罗氏线圈进行了灵敏度测量,并对实验结果进行了分析。另外,论述了罗氏线圈传感器的功能与对应的软硬件措施。对抗干扰问题进行了讨论。

**关键词:** Rogowski 线圈; 灵敏度; 单片机; 抗干扰

**中图分类号:** TM835.2

**文献标识码:** A

**Abstract:** In this paper, the construction of current transducer based on the Rogowski coil is introduced, the principle of Rogowski coil used in current measurement is analysed, the equivalent circuit is discussed and the experimental results are presented. The measures for immunity of interference are also covered.

**Key words:** Rogowski coil; sensitivity; microprocessor; immunity of interference

## 1 概述

长期以来,具有铁心的电磁感应式电流互感器(CT)在继电保护和电流测量中的作用一直占主导地位。但是,随着超高压输电网络的建设,传统的互感器不仅体积和重量加大、价格上升、防爆绝缘困难、安全性能下降,更主要的是它带有铁心,频带很窄,磁饱和时二次信号波形严重畸变,作为继电保护用时,反应速度滞后且容易导致继电器误动作<sup>[1]</sup>。

随着电子技术的发展和微机的普及,在继电保护和测量中,控制部分的能量流和信息流分离,因而监测设备不再需要高功率输出的 CT。另外,随着变电站综合自动化和配电自动化的应用,要求开发出具有测量、保护以及通讯能力的电流传感器。Rogowski 线圈(以下简称罗氏线圈)由于其结构和测量原理方面的特点,受到了广泛的关注。

与带铁心的传统互感器相比,罗氏线圈传感器具有以下优点: 测量范围宽,精度高; 稳定可靠,同时具有测量和继电保护功能; 响应频带宽; 体积小、重量轻、安全且符合环保要求; 易于实现微机化、网络化。

基于罗氏线圈的电流传感器具有以下基本功能: 电流实时测量和显示; 提供继电保护信号;

具有微机通讯接口。笔者参考国内外有关文献,在试验测试和分析的基础上,对罗氏线圈电流传感器的结构、原理、工作过程以及抗干扰和提高可靠性的措施等方面进行了研究。

## 2 系统结构组成

罗氏线圈电流传感器测试系统如图 1 所示,由以下几部分组成: 罗氏线圈部分; 模拟信号处理电路; 单片机采控部分; 输出转换电路; 显示/通讯接口。

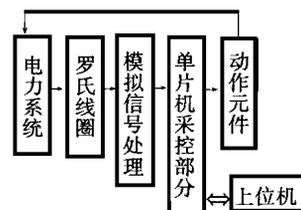


图 1 Rogowski 线圈测量系统框图

电力系统一次电流通过罗氏线圈的耦合以后,从罗氏线圈两端的采样电阻上取到电压信号,经过模拟信号处理电路加工后送至单片机输入端,经过 A/D 转换后,由软件计算分析,最后经过输出转换电路驱动保护动作元件,同时通过显示电路显示各

收稿日期:2002-01-17; 修回日期:2002-03-14

种电网参数。

罗氏线圈电流传感器预留了通讯接口,可与上位机通讯,接受指令并且发送电网参数。

### 3 罗氏线圈的研制

#### 3.1 罗氏线圈测量电流的原理

罗氏线圈测量电流的理论依据是电磁感应定律和安培环路定律<sup>[2]</sup>。当被测电流沿轴线通过线圈时,在环形绕组所包围的体积内产生相应变化的磁场  $H$ 。由安培环路定律得:

$$\oint H \cdot dl = I(t) \tag{1}$$

由  $B = \mu H, E = \frac{d}{dt}$  得:

$$E(t) = d(N \cdot B \cdot dS) / dt = M dI(t) / dt \tag{2}$$

当检测线圈为环形,其截面为矩形时,见图 2。

互感系数  $M$  的值为:

$$M = \mu N h \ln(b/a) / 2 \tag{3}$$

$$L = \mu N^2 h \ln(b/a) / 2 \tag{4}$$

以上各式中:  $H$  为线圈内部的磁场强度;  $B$  为线圈内部的磁感应强度;  $N$  为线圈匝数;  $E$  为线圈两端的感应电压。

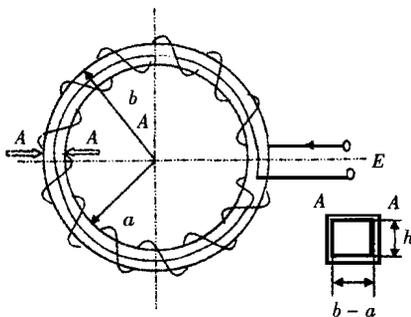


图 2 罗氏线圈结构示意图

式(2)即为一次被测电流和线圈两端电压的对应关系,由(3)式可知,互感系数  $M$  与线圈匝数以及线圈的具体尺寸有关。增加匝数以及线圈尺寸,可以有效地增大  $M$ 。但是匝数过大会引起线圈内阻的增加,因此匝数选取应该适当。

如图 2 所示,将细的漆包线均匀密绕在环型绝缘骨架上,绕制时采用回线是为了消除外界磁场的干扰,均匀密绕是为了减少匝间电容对测量的影响。

#### 3.2 罗氏线圈测量电流的简化模型

图 3 为罗氏线圈测量电流的电路模型<sup>[3]</sup>,因为匝间电容  $C$  很小,在测量工频信号时可以忽略。当增大线圈端口的采样电阻  $R_a = 100 \text{ m}$ ,由于线圈自

感  $L$  引起的阻抗以及线圈内阻  $r$  相对于  $R_a$  很小,可以认为,线圈电压完全降落在  $R_a$  上,因此,测量可以简化为:

$$U = M \frac{dI}{dt} \tag{5}$$

当测量工频正弦波电流时,可以简单地计算出:

$$U = 100 M I \tag{6}$$

其中,  $S = |U/I| = 100 M$  为一次电流和信号电压的比例系数,即罗氏线圈测量正弦波的灵敏度。灵敏度数值的稳定性,是反映罗氏线圈测量精度的重要指标,因此,在制作过程中应对其重点校核。

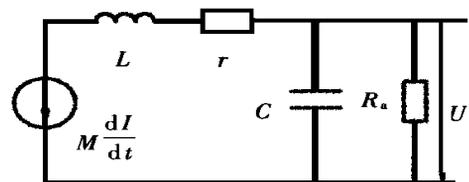


图 3 罗氏线圈测量电流的电路模型

$I$ ——一次侧电流  $L$ ——线圈自感  
 $r$ ——线圈内阻  $C$ ——匝间电容

#### 3.3 试验测试与结果分析

针对 10 kV 系统电压设计制作了罗氏线圈,罗氏线圈的截面为矩形,自制罗氏线圈尺寸为:大半径  $b = 66.13 \text{ mm}$ ,小半径  $a = 45.29 \text{ mm}$ ,矩形截面的高度为  $h = 21 \text{ mm}$ ,匝数  $N = 1592$  匝,用  $0.31 \text{ mm}$  的铜线绕制,线圈内阻  $r = 31 \text{ } \Omega$ 。由(3), (4)式计算出线圈自感  $L = 4.029 \text{ mH}$ ,互感  $M = 2.531 \text{ } \mu\text{H}$ ,  $S = 0.7951 \times 10^{-3}$ 。用试验方式测定罗氏线圈的灵敏度,并与理论计算值作比较,实验装置如图 4 所示。

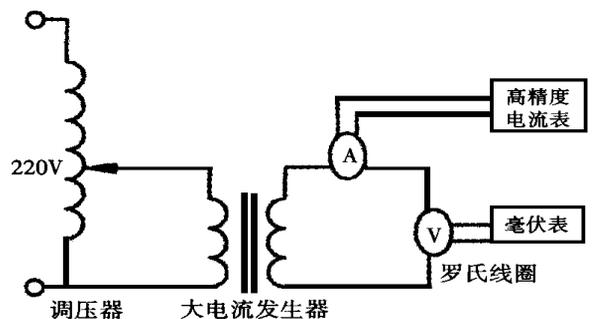


图 4 测试罗氏线圈的实验装置

通过调压器调节大电流发生器的输出电流,用标准互感器和高精度电流表监测罗氏线圈的一次电流,使用毫伏表测量罗氏线圈的信号电压。经过试验得到表 1 所示的测试结果。可以看出,灵敏度与理论计算的误差在 2% 左右,灵敏度的稳定性较好。

表1 灵敏度试验结果

序号	一次侧 电流/A	U 测量值 /mV	灵敏度 S /( ×10 <sup>-3</sup> )	误差/ %
1	100	80.5	0.805	1.22
2	150	121.5	0.810	1.84
3	200	163.0	0.815	2.44
4	250	203.0	0.812	2.08
5	300	242.5	0.808	1.60
6	350	281.5	0.804	1.11
6	400	322.0	0.805	1.23
7	450	361.0	0.802	0.86
8	500	403.0	0.806	1.35
9	550	442.5	0.805	1.23
10	600	480.7	0.801	0.74

对结果进行最小二乘拟合,作出实验曲线如图5所示,同时得到平均灵敏度为  $0.8 \times 10^{-3}$ ,作为采控软件重要的标定参数之一,后文软件介绍中将进一步说明。

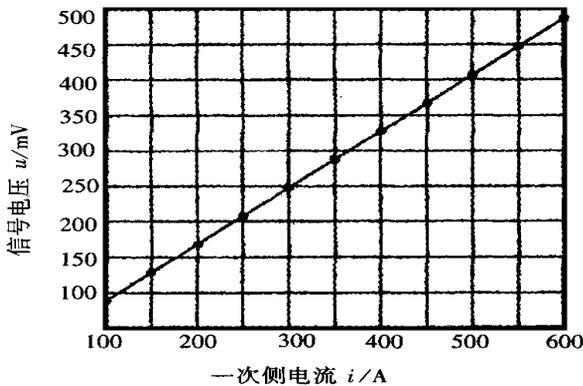


图5 一次电流与信号电压的关系曲线

### 3.4 短路电流的分析

所谓短路是指三相电力系统中不同相之间的非正常连接。

要快速成功地分断短路电流,需要在短路初期能迅速判定短路故障发生的信号;确定短路电流的第1次、第2次过零时刻。在用电流的幅值大小来判断电路中的短路故障时,需要电流大到一定程度时才可以判断(2~3倍正常电流额定值)。而引入电流的上升率,即  $dI/dt$  来判断短路电流的发生时,需要电流传感器具有很好的幅频特性,频带宽,能够反映短路电流的快速变化;电网中短路情况发生时,  $dI/dt$  的变化范围。

经实验测定及模型分析,  $dI/dt = 700$  为判定短路电流发生的判据,利用罗氏线圈频带宽的特点,可

方便地给出电路中发生短路的情况。见4.2节。

## 4 模拟信号的处理

由罗氏线圈检测单元采集的电流信号,不能直接送单片机,必须先进行前置处理,以下介绍所采用的几个主要的电子电路。

### 4.1 绝对值电路

绝对值电路又称为整流电路,如图6所示。其输出电压等于输入信号电压的绝对值,而与输入信号电压的极性无关。

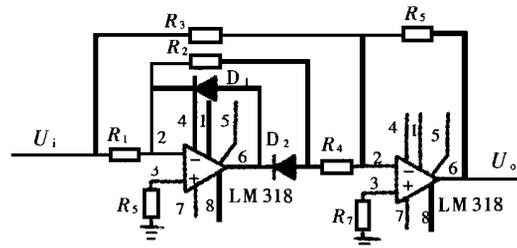


图6 绝对值电路

由图6可推知,当  $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = 2R_4$  时,  $U_o = |U_i|$ ,该电路的输入阻抗为  $R_2 // R_3$  ( $R_2$  与  $R_3$  并联,下同)  $= R_2/2$ ,为使其对前级电路的影响尽可能减小,取其值为  $10k$ ,则  $R_4$  为  $10k$ ;平衡电阻  $R_6 = R_1 // R_2 = 10k$ ,  $R_7 = R_3 // R_4 // R_5$ ,采用两片 LM318 运算放大器,其特点是:失调电压小、温漂低、噪声小、高增益、宽频带、转换速度快、建立时间快。另外,在电路中还对每个运放加了调零电位器。

### 4.2 短路故障电流快速检测电路(简称快速检测)

从罗氏线圈微分端引出的感应电压直接接到比较器上,采用输入阻抗很大的运放 LM339。根据电网发生短路故障时电流的上升速率整定比较器动作的门限值。比较器的输出跳变信号送单片机 HIS.0。

### 4.3 输出信号转换电路

信号输出环节是由 HIS.1 口发出一个高电平信号  $U_{in}$ ,经光电耦合为  $U_{out}$  送入动作元件,通过光电耦合,切断了输入和输出端电气上的直接联系,有效地避免了干扰的窜入;同时该电路由  $U_1$  和  $U_2$  根据动作元件的触发电压进行调节,完成电平转换,电路如图7所示。

另外,模拟信号的处理还包括信号的隔离,线性放大,以及滤波和积分环节,通过积分环节,可以得到与一次电流同相的信号电压。

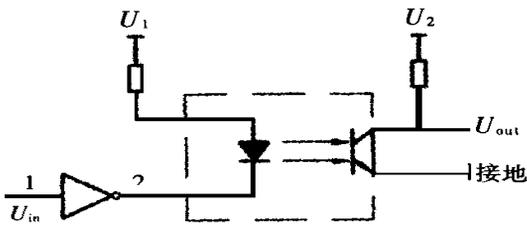


图 7 输出信号转换电路

检测信号通过硬件电路的处理,可以提高测量精度,满足系统各环节的连接需要,并且缓解对单片机运算速度的压力,达到对系统实时性的要求。模拟电路工作的流程框图如图 8 所示。

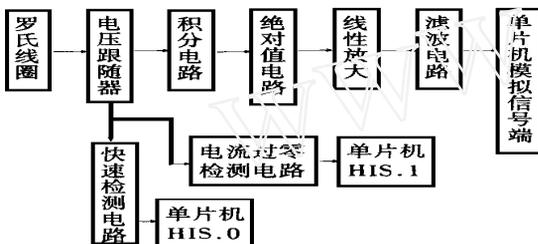


图 8 模拟电路工作流程图

### 5 采控单元介绍

采控单元的核心为 MCS196KC 型单片机,片外扩展存储器,外部程序存储器 EPROM 主要用于存放指令代码和固定数据,而静态数据存储器 RAM 用来存放各种即时采样数据值,以便程序进一步处理。该芯片自带 8 个 A/D 通道,A/D 转换精度为 10 位,转换完成后存入相应的存储区,根据所测罗氏线圈的灵敏度  $S$ ,连同设定的模拟通道增益倍数以及单片机 A/D 转换参考电压一起,可以将采样得到的 10 位二进制数字量转换成所对应的电流有效值。由软件程序计算出电流的有效值,然后调用显示子程序送数码管显示<sup>[4]</sup>。

高速输入口 HIS.0 检测硬件通道跳变信号,检测电流过零点以及计算电流周期。利用罗氏线圈响应速度快,无磁饱和现象等优点,可以快速地测量计算出电流变化的速率<sup>[5]</sup>,利用高速输入口检测硬件跳变信号,为早期的短路故障提供判据。另外,由单片机软件根据过电流的大小,计算出过流保护的反时限时间值,为开关提供分闸信号。

输出信号经过光电耦合、电平转换送到操作机构;由模拟通道处理后的信号经过 A/D 转换和软件处理后送到数码管显示,键盘负责切换显示项以及

给出各种分合闸动作指令,具体的功能由相应的中断子程序完成。图 9 为单片机采控部分的系统框图,其中宽箭头表示数据流,细箭头表示模拟信号以及电平信号。

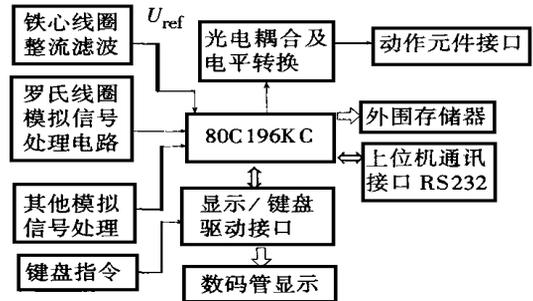


图 9 单片机采控部分结构图

### 6 抗干扰以及提高精度措施

电磁干扰因素是影响罗氏线圈在实际中应用的主要障碍,当空间杂波穿越线圈包围的空间时,其垂直分量引起的感应电压与信号电压叠加,对后续的测量产生干扰,甚至引起硬件误动作。因此,所采用的抗干扰措施除了硬件上附加滤波环节外,还必须对罗氏线圈以及传感器电子部分进行电磁屏蔽。在罗氏线圈部分采用了屏蔽罩<sup>[6,7]</sup>,在内壁开一条能通过磁通的窄缝,允许母线产生的环形磁场通过窄缝进入屏蔽罩内部,而高频的干扰波由于在屏蔽罩的环流中阻抗过大被衰减掉。

单片机采控部分以及模拟信号处理部分都被置于铝制箱体内,从线圈引出的信号传输线屏蔽层需要接地。

A/D 转换的模拟参考电压为  $U_{ref}$ ,输入电压在  $0 \sim U_{ref}$  范围内。10 位 A/D 转换的结果为<sup>[8]</sup>:

$$1023 \times (U_{in} - U_{ANGND}) / (U_{ref} - U_{ANGND})$$

$U_{ANGND}$  为模拟地电压,为了提高 A/D 转换精度,  $U_{ref}$  由一次母线经铁心线圈直接耦合,并且经滤波稳压后提供给单片机。

对于传感器的电流测量范围,预置了测量档,由单片机控制模拟开关,切换不同的放大倍数,然后送入单片机模拟信号输入端。

### 7 结语

对组成罗氏线圈电流传感器的各个环节进行了详细的介绍,对于各部分的结构和工(下转第 26 页)

$r$  为线圈半径;  $e(t)$ ,  $e_{no}(t)$  分别为邻相不通电流、通过电流时被测相的输出电压。

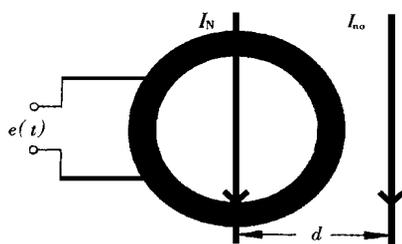


图 4 外磁场影响试验示意图

表 5 外磁场影响试验

$d$	$e(t)/V$	$e_{no}(t)/V$	/ %
$r$	0.328 55	0.328 76	0.06
$2r$	0.328 84	0.328 88	0.01

### 6.4 EMC(电磁兼容) 试验

依据 GB/ T17626.2 - 1998 和 IEC60044 - 8 等标准要求,对 ROCT - 电流传感器进行了电磁兼容试验,包括静电放电抗扰度试验、射频电磁场辐射抗扰度试验、快速瞬变脉冲抗扰度试验、浪涌(冲击)抗

扰度试验、工频磁场抗扰度试验、脉冲磁场抗扰度试验、阻尼振荡磁场抗扰度试验、振荡波抗扰度试验、电压暂降、短时中断和电压渐变抗扰度试验 9 项内容,全部通过。

## 7 结论

空心线圈电流传感器具有精度高、稳定性好、抗干扰能力强、动态范围宽、体积小、重量轻、造价低廉等一系列优点,在电力系统中具有广泛的应用前景,可用于变压器、GIS、断路器、PASS 开关中的电流测量,也可独立制成有源光电电流传感器,它的研究和推广具有明显的经济效益和社会效益。

## 参考文献:

- [1] 揭秉信. 大电流测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [2] 陈本孝. 对交流大电流测量装置中惯性环节的误差分析[J]. 华中工学院学报, 1980, 8(4): 129 - 136.

作者简介:郭晓华(1977 - ),女,博士生,现从事电子式电流传感器研究,电话:027 - 87546407.

(上接第 18 页)

## 6 结论

通信是 SCADA 系统中的重要环节,也是影响 SCADA 系统实时性最显著的环节。下位机和通信机之间,通信方式的选择要考虑的因素较多,因此,可从软件设计的几个方面来提高实时性;在通信机和工作站之间,TCP 和 UDP 的合理选择、直接通信和数据库中转方式的有效结合以及通信规约的合理设计,都将在很大程度上提高系统实时性。

(上接第 22 页)

作原理进行了说明,以实验验证了简化的罗氏线圈测量电流的模型;结合抗干扰措施和提高精度措施对电子线路、单片机采控环节进行了设计。

## 参考文献:

- [1] 王锡凡. 电力工程基础[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998.
- [2] Ramboz, John D. Machinable Rogowski Coil Design, and Calibration [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2): 511 - 515.
- [3] 邹积岩. 罗哥夫斯基线圈测量电流的仿真计算及实验研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 81 - 84.

## 参考文献:

- [1] 提兆旭, 陈赤配. 电力系统计算机调度自动化[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1995.
- [2] 盛寿麟. 电力系统远动原理[M]. 北京:水利电力出版社, 1992.
- [3] Modicon Inc. Modicon Modbus Protocol Reference Guide[S]. 1996.
- [4] Anthony Jones, Jim Ohlund. Network Programming for Microsoft Windows[M]. Microsoft Press, 1999.
- [5] 叶世勋. CDT 循环远动规约 [S]. 电力部, 1999.

作者简介:熊泳(1973 - ),男,硕士,研究方向为基于计算机网络的智能控制。

- [4] 王福瑞. 单片微机测控系统设计大全[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1999.
- [5] 樊宽军. 微秒级电脉冲的测量[J]. 核技术, 1999, 22(8): 469 - 473.
- [6] 李海燕. 毫秒级罗哥夫斯基线圈的研制[D]. 西安交通大学论文, 1986.
- [7] 马乃祥, 周佩白. 电磁干扰的预防[J]. 华东电力, 1999, 27(11): 47 - 50.
- [8] 孙涵芳. Intel 16 位单片机[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1995.

作者简介:翟小社(1972 - ),男,硕士研究生。