电子式电流互感器相位补偿设计

贾春荣[1]，邸志刚[1]，张庆凌[2]，侯国强[1]，金建国[1]

(1. 河北理工大学信息学院，河北省唐山市 063009；2. 河北理工大学科研处，河北省唐山市 063009)

摘要：针对目前难以精确测量小电流这一难题，研制了一种适用于小电流测量的电子式电流互感器。根据其特点对各环节所产生的相位差进行分析计算，针对计算结果及以往相位补偿电路的特点与不足，提出基于全通滤波原理、采用 2 个 1 阶全通滤波电路串联来解决小范围内相位补偿问题，并给出相位补偿电路的仿真结果及系统试验结果。结果表明该设计方案具有良好的相位补偿效果，并且能够使该系统的精度达到国标 0.2 级标准。

关键词：电子式电流互感器；Rogowski 线圈；相位补偿

中图分类号：TM452

0　引言

电流互感器在电力系统中具有重要作用，是电能计量和继电保护的重要设备，其精度及可靠性与电力系统的安全、可靠和经济运行密切相关。然而，随着电力工业的飞速发展，尤其是电力传输系统容量迅猛增加，传统的电磁式电流互感器暴露出一系列严重的缺点[1]，已不能满足电力系统的要求。随着光电子技术及光纤通信的发展，电子式电流互感器以其绝缘结构简单、频带宽、动态范围大等优点[2]应运而生。因此，电子式电流互感器已成为未来互感器发展和变电站系统数字化发展的必然趋势。

本文首先介绍电子式电流互感器的工作原理、Rogowski 线圈测量原理及后续处理电路，然后分析推导线圈和后续电路带来的相位差，最后给出相应的相位补偿电路、仿真结果及部分试验数据。

1　电子式电流互感器

根据 IEC 6004-8 标准，电子式电流互感器可以采用传统电流互感器、霍尔传感器、Rogowski 线圈或光学装置等元件作为传感元件，利用光纤作为一次转换器和二次转换器之间的传输系统，并装有电子器件，用做测量信号的传输和放大，而具有模拟电压输出或数字量输出[3-4]。电子式电流互感器原理和结构的发展方向可归纳为有源型与无源型 2 类。有源型具有结构简单、长期工作稳定性好等优点，所以本课题研制一种有源型电流互感器，并且采用 Rogowski 线圈做一次转换元件，其原理见图 1。

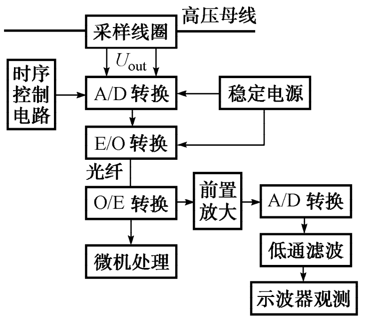

图 1　电子式电流互感器原理框图
Fig. 1　Diagram of electronic current transformers

2　Rogowski 线圈

Rogowski 线圈在电力系统中广泛应用于电流测量，主要是由于它与传统电流互感器相比具有以下优点[5]：线性度好；测量精度高，精度可设计到高于 0.1%，一般为 1%～3%；测量范围宽，同样的线圈可测量电流范围由几安到几千安；频率范围宽，可设计到 0.1 Hz～1 MHz，特殊的可达 200 MHz；可测量其他技术不能使用的受限制领域的小电流。基于以上优点，本课题采用 Rogowski 线圈做传感元件。由于 Rogowski 线圈没有铁心耦合，当用于测量小电流（国际上把小于 1 kA 的电流称为小电流）时，由于互感系数很小，感应出的电压信号很微弱，极易受干扰而难以精确测量。因此，用于小电流测量的 Rogowski 线圈电流互感器的研制被公认为一大难题[6]。为了实际需要，采用专门设计的用于小电流测量的高精度 Rogowski 线圈[7]，其结构示意图见图 2。

电流 $I(t)$ 通过初级绕线时，将在次级线圈感应出电势 $E(t)$，可由下式计算：

收稿日期：2006-10-16；修回日期：2007-05-13。
河北省教育厅自然科学基金资助项目(2006427)。

$$E(t) = -\frac{\mu_0 N_1 N_2 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \frac{\mathrm{d}I(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中:$I(t)$为通过线圈的一次电流;a,b分别为骨架的内径和外径;h为骨架的高度;N_1,N_2分别为线圈的初级和次级匝数。

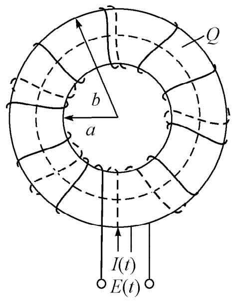

图 2　Rogowski 线圈结构
Fig. 2　Frame sketch map of Rogowski coil

3　相位差分析

由式(1)可见,电子式电流互感器传感头输出的信号是源信号的微分,因此,在后续电路中必须加入积分器将微分信号还原。此外,为了滤除高频干扰,在后续电路中需要引入低通滤波器。传感头中的Rogowski线圈、积分电路和低通滤波器都将引入相位差。下面对各部分引入相位差进行分析推导。

3.1　Rogowski 线圈相位差

若考虑传感元件Rogowski线圈的分布参数(等效电感L_0、电阻R_0和电容C_0)的影响,线圈的输出电压u_o可以表示为:

$$u_o = e(t)\frac{\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_0}}{\mathrm{j}\omega L_0 + R_0 + \frac{1}{\mathrm{j}\omega C_0}} = e(t)\frac{1-\omega^2 L_0 C_0 - \mathrm{j}\omega R_0 C_0}{(1-\omega^2 L_0 C_0)^2 + (\omega R_0 C_0)^2} \tag{2}$$

对于一个确定的Rogowski线圈,由式(1)可知,感应电势与一次电流呈微分关系,输出电压与一次电流之间有一定的相位差,此相位差会造成线圈的输出电压与线圈的感应电势之间有一定的相位差θ_1,此相位差的计算公式为[8]:

$$\theta_1 = -\arctan\frac{\omega R_0 C_0}{1-\omega^2 L_0 C_0} \tag{3}$$

用LRC测试仪可测得线圈各参数值为:$R_0 = 50.789\,2\ \Omega$,$L_0 = 989.36\ \mu\mathrm{H}$,$C_0 = 20\ \mathrm{pF}$,则由式(3)可得,测量工频信号时,其相位差$\theta_1 = 1.17°$。

3.2　积分器的相位差分析

因为线圈输出电压与一次电流是微分关系,而对电流的测量要求是线性的,所以在后续处理电路中需加入积分电路。综合比较以往积分电路的优缺点,本课题采用有源惯性环节积分器,电路见图3。

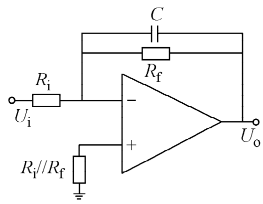

图 3　积分电路
Fig. 3　Integrator circuit

其频率特性方程为:

$$K_F{}'(\mathrm{j}\omega) \approx \frac{-\frac{1}{\mathrm{j}\omega\tau_F}}{\left(1+\frac{1}{\mathrm{j}\omega K_0 \tau_F}\right)\left(1+\mathrm{j}\omega\frac{\tau_0}{K_0}\right)} \tag{4}$$

式中:$\tau_F = R_1 C$,为积分器的积分时间常数;K_0为$\omega=0$时的开环增益;τ_0为相应极点的时间常数,$\tau_0 = 1/\omega_0 = 1/(2\pi f_0)$;$f_0$为截止频率;乘积$K_0\omega_0$称为运算放大器的开环增益-带宽积。

由式(4)可得,当输入为交流信号时,由积分器所引入的相位差为:

$$\theta_2(\omega) = \arctan\frac{1}{K_0 \tau_F \omega} - \arctan\left(\frac{\tau_0}{K_0}\omega\right) \tag{5}$$

为了满足系统对积分精度的要求,稳定工作点,本课题采用失调及温漂小的高精度斩波式运算放大器MAX430构成积分电路,其参数为:$\tau_F = R_1 C_f = 0.004\,7\ \mathrm{s}$,$K_0 = 10^7$,$f_0 = 500\ \mathrm{kHz}$,则由积分器引入的相位误差为:$\theta_2 = 3.879\,427\,3° \times 10^{-6}$。

3.3　滤波器的相位差分析

根据课题设计需要,在后续处理电路中要加入低通滤波器以滤除高频干扰信号,本课题采用二阶巴特沃斯低通滤波器完成此功能。其原理见图4。

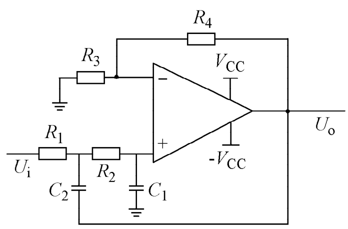

图 4　滤波器电路
Fig. 4　Filter circuit

其传递函数为:

$$A(s) = \frac{A_{uf}}{1+(3-A_{uf})sRC+(sRC)^2} \tag{6}$$

通过选取适当的参数,将这些参数值代入式(6),可得由滤波器引入的相位差为:

$$\theta_3 = \arctan\frac{1\times10^{-4}\omega}{1-2\pi\times10^{-8}\omega^2} = \frac{2}{1-2\pi\times10^{-8}\omega^2+1\times10^{-4}\omega\mathrm{j}}$$

当对工频电流信号进行测量时，$\omega=2\pi\times50$，则 $\theta_3=\arctan 0.031\,513\,6=1.806°$。

4 相位补偿设计

由以上分析计算可知，本系统用于测量工频电流时，将会产生相位差 θ，其值为：$\theta=\theta_1+\theta_2+\theta_3\approx 1.825\,5°$，此值远大于 IEC 60044-8 对 0.2 级电子式电流互感器的要求。因此，为了满足标准，必须采取一定的相位补偿措施。目前相位校正可采用全通滤波器[9]、滤波网络[10]和数字移相[11]等方案，这些方案的调相范围均为 0°～180°，当调节度数约 90°时，很容易实现，但如果在调节度数较小时，就很难实现。因此需要对此部分进行改进。

在本课题中，调相环节主要用于补偿 Rogowski 线圈、积分环节、滤波环节带来的相位差。由上述分析计算可知，相位补偿环节的调节范围应该为 2°～10°。因此，在电路设计中，采用 2 个 1 阶全通滤波电路串联来解决这个问题，电路见图 5。

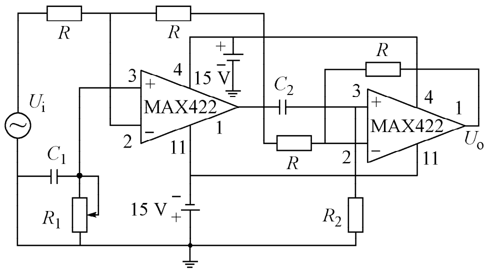

图 5 全通滤波电路
Fig. 5 Circuit of all pass filter

将 R_1 换为可调电阻以实现对相位的调解。通过仿真，调相结果理想时仿真结果见图 6、图 7。

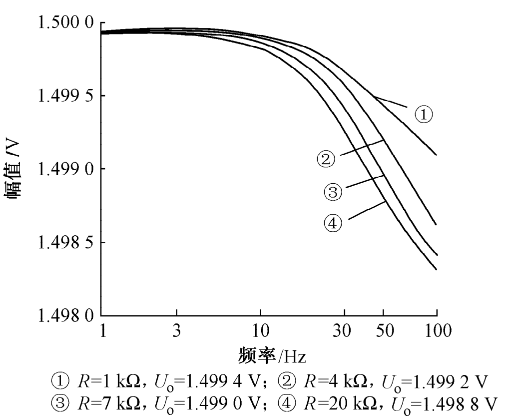

图 6 全通滤波器幅频响应
Fig. 6 Amplitude response of all pass filter

由于在试验过程中采用的实际电阻值与设计理论值有误差，从图 6 中可以看出，全通滤波器的幅值稍微有些波动，但是足以满足对精度的要求。

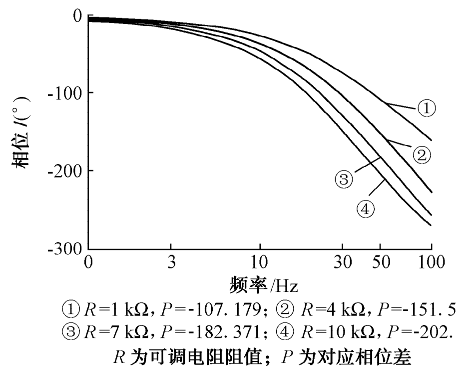

图 7 全通滤波电路相频响应
Fig. 7 Phase response of all pass filter

5 试验结果

本课题组对 IEC 60044-8 标准规定的电子式电流互感器的测试点进行常温和高低温比差及相位差测试，即在室温、－40 ℃及 70 ℃环境下采用调压器输出电流进行试验。采用的试验装置如下：

1）光标式 0.1 级高精度电流表。

2）TDS2002 数字示波器，用来观察输出波形与被测电流波形。

3）HG1416 工频相位计，用来测量系统相位差。

4）Keithley 2000 型高精度数字万用表，用来测量系统输出电压。

5）环境温度控制装置：西门子冰柜，用来自动数字显示温度，可实现－40 ℃的测试环境；电热箱，数字显示温度，可实现 70 ℃的测试环境。

通过以上试验装置对本系统进行测试，试验结果如表 1～表 3 所示。

表 1 常温试验数据
Table 1 Examination result at normal temperature

I/A	U_o/mV	E_{o1}/mV	E_{o2}/mV	ε/(%)	φ
0.25	0.622	25	24.80	－0.80	32.1
1.00	2.497	100	99.63	－0.37	16.3
5.00	12.489	500	498.85	－0.23	10.9
6.00	14.990	600	601.39	0.23	11.1

注：U_o 为传感头线圈输出的电压值；E_{o1} 为输出电压理论值；E_{o2} 为系统实际输出电压值。

表 2 －40 ℃试验数据
Table 2 Examination result at －40 ℃

I/A	U_o/mV	E_{o1}/mV	E_{o2}/mV	ε/(%)	φ
0.25	0.623	25	24.81	－0.76	32.4
1.00	2.498	100	99.68	－0.32	16.5
5.00	12.490	500	498.95	－0.21	11.1
6.00	15.010	600	601.38	0.23	11.3

注：U_o 为传感头线圈输出的电压值；E_{o1} 为输出电压理论值；E_{o2} 为系统实际输出电压值。

表 3 70 ℃试验数据
Table 3 Examination result at 70 ℃

I/A	U_o/mV	E_{o1}/mV	E_{o2}/mV	ε/(%)	φ
0.25	0.624	25	25.19	0.76	32.7
1.00	2.498	100	100.38	0.38	16.8
5.00	12.490	500	500.12	0.24	11.3
6.00	15.010	600	601.52	0.25	11.5

注：U_o 为传感头线圈输出的电压值；E_{o1} 为输出电压理论值；E_{o2} 为系统实际输出电压值。

由试验结果可知，在 IEC 60044-8 规定的测试范围内与理论值有一定的差距，这是由于试验环境及仪器设备所引起的。若采用标准设备，并在干扰不严重情况下完全可达 0.2 级标准。

6 结语

本文主要对电子式电流互感器的相位差进行研究，设计相位补偿电路并给出其 Pspice 仿真结果及试验结果。本电流互感器的额定测量电流为 5 A，就目前试验情况来看，其精度可以达到 0.2 级要求。

参 考 文 献

[1] 王廷云，罗承沐，田玉鑫. 电力系统中光电电流互感器研究. 电力系统自动化，2000，24(1)：38-41.
WANG Tingyun, LUO Chengmu, TIAN Yuxin. Study on optical current transformer in power system. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 38-41.

[2] TAKAHASHI M, SASAKI K, KLYOHISA T. Optical current sensor for DC measurement// Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Asia Pacific: Vol 1, Oct 6-10, 2002, Yokahama, Japan. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 440-443.

[3] IEC 6004-7 Electronic voltage transformers.

[4] IEC 6004-8 Electronic current transducers.

[5] 陈庆，李红斌，张明明，等. 采用主副印刷电路板构造的 Rogowski 线圈性能分析及设计. 电力系统自动化，2004，28(16)：79-82.
CHEN Qing, LI Hongbin, ZHANG Mingming, et al. Analysis and design of rogowski coils with mian and assistant printed circuit boards. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 79-82.

[6] RAY W F. The use of Rogowski coils for low amplitude current waveform measurement// Proceedings of IEE Colloquium on Measurement Techniques for Power Electronics, Dec 16, 1991, London, UK. Stevenage, UK: IEE, 1991: 6/1-6/5.

[7] 邸志刚，贾春荣，郑绳楦. 用于小电流测量的高精度 Rogowski 线圈的研究与设计. 电气应用，2005，24(5)：62-65.
DI Zhigang, JIA Chunrong, ZHENG Shengxuan. The research and design of high precise Rogowski coil used to measure small current. Aplication of Electric, 2005, 24(5): 62-65.

[8] 田朝勃，索南加乐，罗苏南，等. 应用于 GIS 保护及监测的罗氏线圈电子式电流互感器. 中国电力，2003，36(10)：53-56.
TIAN Chaobo, SUONAN Jiale, LUO Sunan, et al. Rogowski coil electronic current transducer applied to protection and monitoring of GIS. Electric Power, 2003, 36(10): 53-56.

[9] 刘家芳，刘霞忠. 混合式光电电流互感器相位补偿技术. 电力自动化设备，2005，25(5)：30-33.
LIU Jiafang, LIU Xiazhong. Phase compensation technique for hybrid optoelectronic current transformer. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(5): 30-33.

[10] 钱政，申烛，罗承沐. 电子式光电组合电流/电压互感器中的相位补偿技术. 电力系统自动化，2002，26(24)：40-44.
QIAN Zheng, SHEN Zhu, LUO Chengmu. Application research of phase compensation in electronic photoelectric integrated current/voltage transformer. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 40-44.

[11] 陈仲，徐德鸿. 基于基波相位补偿策略的无延迟谐波检测. 电力系统自动化，2005，29(10)：50-54.
CHEN Zhong, XU Dehong. Harmonic detection without delay based on phase compensation of fundamental component. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 50-54.

贾春荣(1977—)，女，硕士，讲师，研究方向为光电子技术。E-mail：JCR0107@sohu.com

邸志刚(1975—)，男，硕士，讲师，研究方向为光纤传感器。E-mail：DZG0512@sohu.com

张庆凌(1953—)，男，高级工程师，研究方向为自动化控制。

Phase Compensation Design of Electronic Current Transducer

JIA Chunrong, DI Zhigang, ZHANG Qingling, HOU Guoqiang, JIN Jianguo

(Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China)

Abstract: According to the difficulty of measuring low amplitude current accurately, an electronic current transducer applied to low amplitude current measurement is studied. On the base of system′s characteristic, the phase error caused by system is analyzed and calculated, then according to the result and the characteristics and shortage of anciently phase compensation circuits, a new phase compensation circuit is designed, which based on all pass filter circuit, namely adopted two series one rank all pass filter circuits to compensate small phase error, and the imitation and examination result is given. The result indicates that this compensation project has well phase compensation effect, and also can make the system meet 0.2 level of international criterion.

This work is supported by Hebei Province Education Clerical Office Natural Science Foundation (No. 2006427).

Key words: electronic current transducer; Rogowski coil; phase compensation