感应分流器反馈电子补偿模块设计

余炳光[1]，刘冬梅[1]，熊 魁[2]，周 峰[2]，陈湘波[1]

（1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院，安徽 合肥 230009；2. 中国电力科学研究院武汉分院计量研究所，湖北 武汉 430000）

摘要：作为一种高准确度和高稳定性的电流比例标准，感应分流器常被高效运用于电流互感器的检定以及电流比较仪的量程扩展之中，同时适用于工频小电流量值溯源。在此背景下，提高感应分流器的测量准确度就显得十分必要。分析了感应分流器的模型和误差，研究和借鉴了互感器的误差特性和补偿方法，运用反馈补偿的原理设计了一种有源电子补偿模块，并对感应分流器进行误差补偿。实验证明此种电子补偿方法能够将感应分流器的测量准确度提高到10^{-6}量级，并且在实测中具有良好的负载特性。

关键词：感应分流器；校准；误差特性；电子补偿；高准确度

Design of compensation module of induction current divider

YU Bingguang[1], LIU Dongmei[1], XIONG Kui[2], ZHOU Feng[2], CHEN Xiangbo[1]

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Wuhan Branch of China Academy of Electric Power Science,Wuhan 430000, china)

Abstract: As a standard current proportion with high accuracy and stability, induction current divider is often used in calibrating current transformer and measuring range expansion of current comparator. It is also suitable for power frequency and small current magnitude traceability. With this background, it is very necessary to improve the measurement accuracy of induction current divider. In this paper, the model and error of induction divider are analyzed and the error characteristics and compensation method of inductor are studied and used for reference. Therefore, an active electronic compensation module is designed based on the principle of feedback compensation to compensate the inductor error. The experimental results show that the electronic compensation method can improve the measuring accuracy of the induction current divider to be 10^{-6}, and this method has good load characteristics in the actual test.

Key words: induction current divider; calibration; error characteristics; electronic compensation; high precision

0 引言

感应分流器是一种自耦式的电流互感器，近些年来，它被有效地运用于互感器的校准和测量中。感应分流器本身具有结构简单、自耦式绕线方式的优点，使其在电力测量和检定方面能够获得高准确度和稳定度。同时由于感应分流器本身结构决定其具有一定的带负载的能力，从而在交流电参数测量及某些非电量参数的电测技术中得到日益广泛的应用[1]。

感应分流器的准确度受设计方案、制作所用磁性材料以及制造工艺方面的限制，一般要得到高于10^{-6}的准确度是比较困难的[2]。感应

国家重点研发计划子课题（2017YFE0301105）

分流器的误差受到很多方面因素的影响，可以将这些影响分为外部影响和内部影响。外部影响有感应分流器的外部磁场、二次侧负载等；内部影响有绕组绕制的均匀性、容性泄漏电流以及无法用一般的电工式手段消除的励磁误差等。而在感应分流器中起主要影响的误差就是励磁误差[3]。

由于感应分流器是一种较高准确度的检测装置，且其误差补偿方法比较少见，所以在对其误差补偿时通常借鉴互感器的补偿方法，互感器的误差消除方法分为无源补偿方法和有源补偿方法[4]。无源补偿方法多用于电流互感器的误差补偿之中，也称之为电工式补偿方法，比较常见的有匝数补偿、磁分路补偿、短路匝补偿和电容补偿等方法[5]。但是这些补偿方法不能完全消除互感器中的励磁误差[6]。有源补偿方法在20世纪90年代被提出，也称为零磁通补偿方法[7]。这种方法将外部电动势或者磁动势作为补偿源接入互感器的绕组中，补偿互感器测量中的励磁误差[8]。

针对感应分流器的自身特性，本文通过研究国内外互感器误差补偿的方法，设计了一种用于感应分流器误差的有源补偿电子电路模块。首先阐述了感应分流器的原理和误差原因，在此基础上介绍了感应分流器电子补偿模块的工作原理，从理论上分析其误差，并在实验条件下阐述其优点。

1 感应分流器原理及其常见误差

感应分流器是一种依据电磁感应原理设计的电流测量仪器，对于难以测量或者不能测量的一次电流，可以将其转化为可以测量的二次电流，由此间接测量出一次电流。同时感应分流器根据自耦式电流互感器的原理，在铁心上绕制多匝自耦线圈，按照不同的电流比引出抽头，可以选用多种电流比，并且提高准确度。感应分流器的基本结构如图1所示，通常由主铁心和比例绕组构成，其中一次绕组匝数为N_1,流过的电流为I_1，二次绕组匝数为N_2，流过的电流为I_2，在铁心内部起励磁作用的励磁电流为I_0。

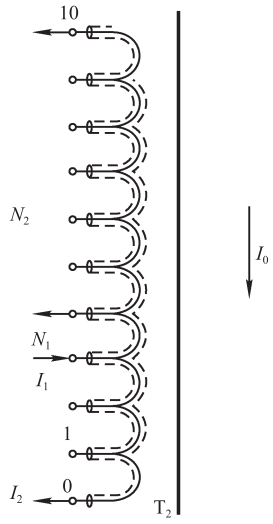


图 1 感应分流器结构原理

Fig. 1 Schematic diagram of induction current divider

根据安匝平衡定律

$$I_1N_1 + I_2N_2 = I_0N_1 \tag{1}$$

当一次绕组中流过电流时，由于电磁感应在二次绕组中就会感应出二次电动势，在二次绕组接通二次负荷的情况下，有二次电流流通。一次绕组产生的磁动势与二次绕组产生的磁动势的向量和即为励磁磁动势。由于励磁磁动势在绕组内部产生，所以无法测量，使得感应分流器实际测量的电流减小，产生了励磁误差。对于绕制了感应分流器来说，其比例绕组上同时绕制一次绕组和二次绕组，使得一次绕组和二次绕组之间没有物理隔离。这样一次绕组产生的电动势可以反向补偿二次绕组的电动势，继而使感应分流器的励磁磁动势变小，从而导致感应分流器的测量准确度降低。

除励磁误差外，感应分流器的误差多是其结构上或者因环境变化产生的外部误差，可以通过改变感应分流器的绕制结构和设计方法进行结构性的优化。由于励磁误差是存在于感应分流器原理上的误差，对于感应分流器设计上的改动只能有限地减少励磁误差，并不能满足较高的要求。

2 有源电子补偿式感应分流器设计

本文采用有源补偿的方法，设计了一种用于感应分流器误差的有源补偿电子电路模块，通过利用零磁通的原理，对感应分流器进行励磁误差补偿，这种方法在理论上可以完全消除励磁误差，从而获得较高的测量准确度。

将检测绕组检测得到的励磁误差用电子补偿模块进行处理，然后注入回比例绕组。其结构如图2所示。图2中，由主铁心T_1、检测绕组N_D、一次补偿绕组N_C、辅助铁心T_2、比例绕组N_1和N_2及电子补偿模块M组成。主铁心T_1上依次绕制检测绕组N_D和一次补偿绕组N_C，并整体嵌套入辅助铁心T_2中，在辅助铁心外绕制比例绕组N_1和N_2，且N_2的匝数与补偿绕组N_C的匝数相等。

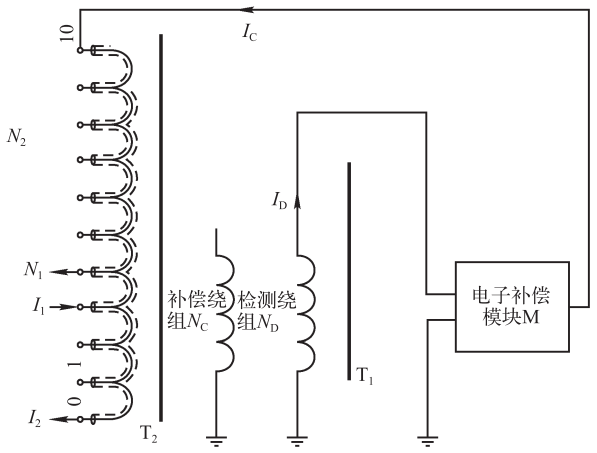


图 2 补偿式感应分流器原理

Fig. 2 Schematic diagram of compensated induction current divider

其中检测绕组N_D用于测量感应分流器的励磁误差信号，一次补偿绕组N_C为比例绕组提供间接接地。电子补偿模块M为运算放大电路。当主铁心处于非零磁通状态时，检测绕组上感应的提供电子补偿模块的输入信号，其产生的补偿电流进入补偿绕组以抵消主铁心的励磁磁通，直到其为零磁通状态，电子补偿模块与感应分流器组成一个自平衡的负反馈系统，能自动补偿励磁误差，使感应分流器测量准确度提高。

由于感应分流器比例绕组上存在安匝之差，所以在图2中，检测绕组上会感应产生一个检测电压U_d，该检测电压表达式为

$$U_d = (I_1N_1 + I_2N_2)Z_d = I_0N_1Z_d \tag{2}$$

$$Z_d = \frac{2f\mu AN_d}{d} \tag{3}$$

式中，Z_d为感应分流器主铁心的灵敏度；U_d为感应分流器检测绕组检测电动势。

期望补偿磁动势等于励磁磁动势，即$I_0N_1=I_CN_2$。

其误差安匝数为

$$\sum IN = \varepsilon IN \times 5\% \times 10\% \tag{4}$$

$$I_CN_C = \sum IN \tag{5}$$

$$I_C = \frac{\varepsilon IN \times 5\% \times 10\%}{N_C} \tag{6}$$

二次绕组阻值为R_2，则感应分流器补偿绕组的注入电动势为

$$U_C = I_CR_2 \tag{7}$$

这样可以理论计算出感应分流器电子补偿模块的输入端和输出端的信号大小。

当感应分流器正常工作时，比例绕组中通过一次电流I_1和二次电流I_2，同时给辅助铁心T_2励磁，则有磁动势平衡方程为

$$I_1N_1 + I_2N_2 = I_0N_1 \tag{8}$$

式中，I_0为辅助铁心上励磁电流。

由于主铁心T_1嵌套于辅助铁心T_2和比例绕组，因此第一级互感器的励磁磁动势I_0N_1给主铁心T_1励磁，则绕制在主铁心上的检测绕组N_D产生感应电流I_D，则有磁动势平衡方程为

$$I_0N_1 + I_DN_D = I_{0D}N_1 \tag{9}$$

式中，I_{0D}为主铁心上励磁电流。

检测绕组N_D产生的感应电动势进入电子补偿模块M在比例绕组N_2上产生相应补偿电压和补偿电流I_C，则有磁动势平衡方程为

$$I_0N_1 + I_DN_D + I_CN_2 = I_{0D}N_1 \tag{10}$$

忽略掉微小的检测绕组励磁磁动势，对于外加检测绕组和补偿绕组的感应分流器存在如

下公式

$$-I_D N_D = I_0 N_1 + I_C N_2 \tag{11}$$

当二次绕组上产生的补偿磁动势近似于励磁误差时，感应分流器即处于较为理想的状态。

设计的电子补偿模块，假设增益为G。

当感应分流器处于理想状态时，有

$$I_C = GI_D \tag{12}$$

代入式（5）可得

$$\frac{I_C}{G} = \frac{-\left(I_0 N_1 + I_C N_2\right)}{N_D} \tag{13}$$

由于$-I_0 - I_C N_2/N_1$为一微小值，以ε_1替代，$I_D/G=\varepsilon_1 N_1/N_D$。所以在设计原理上电子补偿模块的增益设计要远大于$N_1/N_D$，可以使等式平衡。同时在设计上，考虑到现场的实际电压电流限制，应将电子补偿模块增益取一个合适的值，方可满足设计要求。

在带电子补偿的感应分流器设计稳定性方面，通过将检测到的感应分流器励磁误差以电压信号的方式传递至电子补偿模块M，再通过补偿模块M处理的补偿电压信号进入补偿绕组，并对感应分流器进行补偿。通过这样的方法，在电子补偿模块工作时，可以将误差信号与补偿信号形成一个动态平衡，进而满足整个系统的稳定性。

3 电子补偿模块设计

电子补偿模块的原理如图3所示。图中包括比例放大电路、积分电路、滤波电路以及电路跟随器等部分。

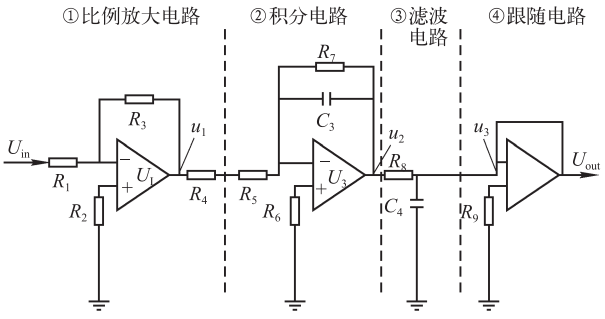


图 3 电子补偿模块原理

Fig. 3 Schematic diagram of electronic compensation module

比例放大电路部分，感应分流器电子补偿模块的设计目标是基于对感应分流器检测电流进行放大，可以通过合适的增益设计，运用放大电路对检测绕组电动势进行放大处理，满足补偿磁动势$I_C N_C$等于励磁误差$I_0 N_1$。第一级比例放大电路的传递函数为

$$U_1 = \left(\frac{R_3 + R_1}{R_1}\right)U_i = \left(\frac{R_3}{R_1} + 1\right)U_i \tag{14}$$

积分电路主要用于对第一部分放大后的信号进行积分累加。积分电路的输出电压为

$$u_2(t) = -\frac{1}{C_3 R_5}\int u_1(t)\,\mathrm{d}t \tag{15}$$

在信号滤波方面，本文采用RC滤波。设计中信号频率为工频50 Hz，但是在试验场合会有高电压设备产生杂散的电磁场，补偿信号会受电磁场中的噪声信号影响而降低补偿效果，使感应分流器测量准确度不能够提升甚至还会出现测量准确度下降的情况。在电子补偿模块设计中增加了无源滤波电路，通过设计其通频带来降低试验中噪声所产生的影响。RC滤波电路的截止频率为

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \tag{16}$$

电路跟随器部分，感应分流器误差试验通常是与标准器的准确度作比较，在电路中由于放大电路、积分电路都用了运算放大器的反向端，所以应采用跟随电路对处理过的补偿信号进行反向处理，此种方法得出的补偿信号可以尽可能使补偿信号与测量信号相位一致，从而降低误差。跟随电路输出为

$$u_0(t) = -u_3(t) \tag{17}$$

通过设计的电子补偿模块，能将感应分流器的检测误差信号进行一定数量级的比例放大，满足理论计算得到的放大比例。同时上述设计中的电子补偿模块具有积分电路和电压跟随器，能够通过调整这两部分电路，进而对感应分流器反馈补偿信号的相位进行调整，不仅能对比值差有不错的补偿效果，而且对相位差也会有理想的补偿。

4 有源电子补偿式感应分流器检定试验

对于感应分流器准确度的测试一般采用更高准确度的标准器件进行检定。本试验中对有源电子补偿式感应分流器选用一种高准确度电流比较仪进行检定。

图4显示了电流比较仪检定带电子补偿的感应分流器线路。图4中，T_a为一种供电用的电流互感器，由它给整个工作回路供电；T_x为试验中需要检定的感应分流器；T_0为标准器，是一种高准确度的电流比较仪，用于检定感应分流器准确度。需检定的感应分流器和该电流比较仪电流比一致。由于感应分流器的结构与自耦式电流互感器相似，所以一次绕组、二次绕组之间没有隔离。在检定试验中，试验线路中的二次回路不能接地，同时试验中采用的标准器的工作回路也不能接地。

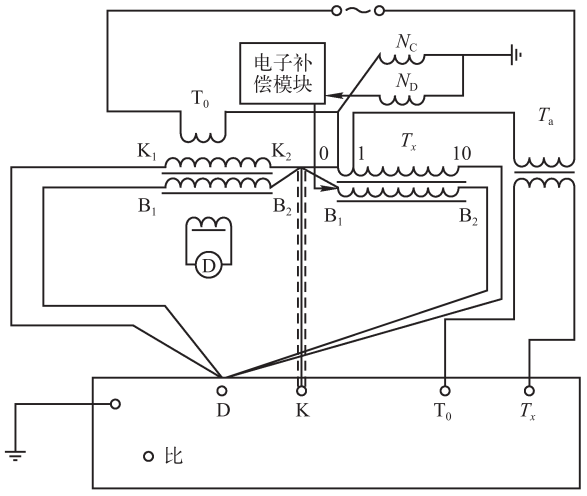


图 4 检定试验线路图

Fig. 4 Verification test circuit diagram

在试验中，采用的带补偿双级式感应分流器电流比为5～20 A/5 A，比例绕组串接10段而成，可以通过对不同抽头的连接，得到不同的电流比，通过试验线路对双级感应分流器进行误差检定。

检定结果如表1、表2所示。表中，f为比值差；δ为相位差，其数量级单位都为10^{-6}。

从表1中可以看出，对于未接反馈电子补偿模块的感应分流器，其测量过程中存在励磁误差的影响，使其误差较带反馈电子补偿模块的感应分流器要大，即带反馈电子补偿模块的感应分流器准确度更高。这是因为在接入反馈电子补偿模块的情况下，使得感应分流器工作在有源的状态，通过电子补偿模块对其励磁误差进行补偿。

表 1 感应分流器误差测试（匝数比 20: 5）

Tab. 1 Induction current divider error test

额定电流百分比（%）	无补偿		接补偿绕组		接比例绕组	
	f	δ	f	δ	f	δ
5	9.6	11	9.0	8.3	6.6	7.2
20	10.2	10.3	9.2	7.3	7.5	6.0
100	10.9	9.5	9.2	6.4	7.6	5.4
120	12.2	7.3	10.0	5.6	8.7	5.3

表 2 感应分流器误差测试（匝数比 10: 5）

Tab. 2 Induction current divider error test

额定电流百分比（%）	无补偿		接补偿绕组		接比例绕组	
	f	δ	f	δ	f	δ
5	8.3	16.0	8.5	9.5	6.8	8.0
20	9.2	14.9	9.0	8.3	7.2	7.9
100	10.1	14.3	9.3	7.4	7.8	6.4
120	10.2	14.1	10.1	6.6	8.2	5.9

结合表1、表2可以看出，在匝数比为20：5和10：5的情况下，带感应分流器测量比值差在各个额定电流比下能够比值差平均提高约3.0×10^{-6}，说明感应分流器可以通过电子补偿模块来动态调节其励磁误差，从而达到误差与补偿的平衡，满足整个带电子补偿感应分流器的稳定性。

对于感应分流器的相位差，根据表1、表2可得到带反馈电子补偿的感应分流器在各个额定电流比下平均提高约5.68×10^{-6}，这是由于本设计中的反馈电子补偿模块具有积分电路和电路跟随器，通过对输出反馈信号的相位调节，能够使反馈补偿信号在相位上更好地满足理论需求，这也在试验中使带反馈电子补偿的感应分流器相位差有较大的减小。

通过对比分析在同样接补偿下的感应分流器，可以看出在反馈补偿信号接入比例绕组较接补偿绕组测量准确度更高，这是由于反馈电

子补偿模块接入比例绕组时，其地线和比例绕组共地，减小了感应分流器的容性误差。

总的试验结果显示，带电子补偿的感应分流器不仅在比值差上准确度有一定的提升，更由于电子补偿模块的特性在相位差上也有很好的补偿效果。

5 结束语

本文通过对作为电流比例标准的感应分流器的研究，分析了感应分流器的原理及其结构模式，研究了感应分流器在测试中通常存在的误差以及其原理，最终提出了一种感应分流器的电子补偿模块。通过试验证明，该设计可以降低励磁误差在感应分流器工作中的影响，这种带电子补偿模块的感应分流器在比值差和相位差上较未加入电子补偿模块前有较大的提升。

参考文献

[1] 熊魁，姜春阳，雷民，等．感应分流器的误差特性研究及其试验[J]．电测与仪表，2017，54(8)：80-84．

[2] 李鹤，MOHNS F，雷民，等．一种高准确度电子补偿式电流比较仪[J]．电测与仪表，2017，54(19)：96-101．

[3] 苗新法，杜丽霞．互感器校验仪算法误差分析及设计实现[J]．电工电能新技术，2016，33(11)：70-74．

[4] SLOMOVITZ D，TRIGO L，FAVERIO C．Two-stage current transformer with electronic compensation[J]．Bioinformatics，2012，1(1)：492-497．

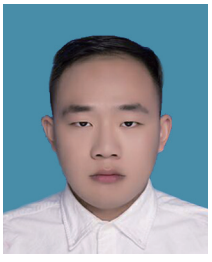
[5] SOUDERS T M．Wide-band two-stage current transformers of high accuracy[J]．IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，1972，21(4)：340-345．

[6] BEARD G E．100：1 Step-up amplifier-aided two-stage current transformer with small ratio errors at 60 Hz[J]．IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2007，28(2)：146-152．

[7] 赵修民，赵屹涛，赵屹榕．电流互感器与电流比例标准[M]．北京：中国电力出版社，2014．

[8] 王乐仁，徐家恒．带量程扩展器的工频感应分流器的校准与应用[J]．计量学报，2008，29(2)：159-163．

作者简介



余炳光

余炳光（1994－），硕士，从事电工电子新技术方面研究。

(收稿日期：2019－09－26)EA