

# 用于 mV 级交流电压溯源中的感应分压器 设计及自校准实现

杭 标 高金伟 屠治国  
(北京东方计量测试研究所 北京 100086)

**摘要:** 叙述了 2~500 mV/1 kHz~1 MHz 范围内的低电压交直流转换溯源技术,介绍了利用十进制感应分压器在低电压交直流转换技术的量程的扩展上的应用。介绍了基于汤普森方法对十进制感应分压器的设计和校准,并给出了校准的试验数据。同时也描述了一个可抬高电位的,具有一个额外二次绕组的校准用感应分压器的设计和绕制。校正电路和输入输出电压隔离分压器以及 N 型连接头的设计进一步降低了标准分压器的磁误差。校准系统应用于毫伏级电压和工频下的感应分压器。

**关键词:** 感应分压器;自校准

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Design and self-calibration of an IVD used for AC-DC traceability at millivolt

Hang Biao Gao Jinwei Tu Zhiguo  
(Beijing Oriental Institute of Measurement, Beijing 100086, China)

**Abstract:** This paper describes a low-voltage AC-DC transfer traceability technology at 2—500 mV/1 kHz—1 MHz range, it also describes the use of a decimal inductive voltage divider used for the scale expansion of AC-DC transfer technology. Thompson method is introduced in the paper and it gives the experimental data of calibration of IVD. This article also describes the design and winding of a calibration IVD with an additional secondary winding. Correction circuit and input-output isolation voltage divider, and N-type connector is designed to further reduce the magnetic error. The calibration system is applied at millivolt voltage and industrial frequencies.

**Keywords:** inductive voltage divider; self-calibration

### 1 引言

交流电压是电学计量专业的重要参数之一,也为交流电流、交流阻抗等其他交流参量提供溯源依据。交流电压量值溯源的途径一般有交直流转换、数字采样法以及交流电压量子基准等<sup>[1]</sup>。交直流转换是最普遍的交流电压溯源方式,通过交直流转换仪器,用功和热的形式将交流电压与已知直流电压进行比较,最终溯源到直流电压。

应用半导体 RMS 传感器的交直流转换标准在校准实验室中广为应用,作为交流电压的量传标准<sup>[2]</sup>。其溯源直接影响交流电压量值的准确性。在 500 mV 以下量程,电压交直流转换标准的溯源不论从量程还是不确定度上都

存在一定问题。国际上校准 mV 级量程的电压交直流转换标准通常采用步进递减法和分压法<sup>[3]</sup>。NIST 给出了步进递减法的包含负载误差的不确定度,如表 1 所示。

**表 1 NIST 步进递减方案的校准不确定度 ( $k=2$ )**

电压 频率	200 mV	100 mV	50 mV	20 mV	10 mV
100 Hz	14	16	30	50	60
1 MHz	150	170	270	320	340

加拿大 NRC 在美国 NIST 步进递减法的基础上进行了改进,增加了 1 台低电压交直流转换标准作为过渡标准,配合原系统的微电位计和低电压交直流转换标准完成校准过程;NRC 用 LCR 对 2 台电压交直流转换标准的输

收稿日期:2015-05

入阻抗进行了测试,发现 100 kHz 以上输入阻抗以容性分量为主,负载误差的修正适用范围有限<sup>[4]</sup>。因此 NRC 采用微电位计带负载校准的方法,额外增加一台低电压转换标准进行过渡,避免了可能存在不确定因素的负载误差修正方式,并实现了自动化。

中国国家计量院(NIM)采用二进制感应分压器的方案<sup>[5]</sup>,研制了 3 套感应分压器,分别用于 1 kHz、20 kHz 和 100 kHz;在 1 MHz 下,由于磁芯材料、结构和方法的限制而改用 10 : 1 的感应分压器;在 10 mV/1kHz~1 MHz 范围内不确定度报告为  $8 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ 。

## 2 感应分压器在量程扩展上的应用

由于感应分压器(IVD)具有高精度和高稳定性的特点,它经常被当作比例标准应用于阻抗和交流电压计量中。现有的感应分压器大多应用于音频范围内,然而为了实现对交直流转换溯源标准量程的扩展,工作在工频范围内 mV 级别的感应分压器也是必需的。这意味着感应分压器具有相对较小的磁芯绕组和线圈匝数<sup>[6]</sup>。本文课题研究的核心工作即将能自校准的 10 : 1 感应分压器应用于高频 mV 伏级电压下。

中国空间技术研究院 514 研究所设计制造了一套工作频率为 1 kHz~1 MHz 工作电压为 20~500 mV 的可自校准的感应分压器,经过实验验证该套分压器性能良好,可用于交直流转换标准的输入前段作为输入源的电压变换,以实现量程扩展的作用<sup>[7]</sup>。将对该套 10 : 1 感应分压器的设计进行介绍,同时介绍基于汤普森方法的校准电路的设计和操作。

## 3 汤普森方法校准感应分压器

用汤普森方法校准 10 : 1 感应分压器的简化电路如图 1 所示<sup>[8]</sup>。IVD 1 为被校感应分压器;C/T 是校准用感应分压器;IVD 2 是辅助分压器,为 C/T 的二次绕组的低压输出端提供压降的辅助设备;Lock-in AMP 是用来做电压比较器的锁相放大器。为确保校准结果尽量接近 10 : 1 分压器的实际使用,在输入信号和主分压器之间还采用了一个输入输出比为 1 : 1 的隔离分压器 IT,以消除地电压对测量产生的干扰。

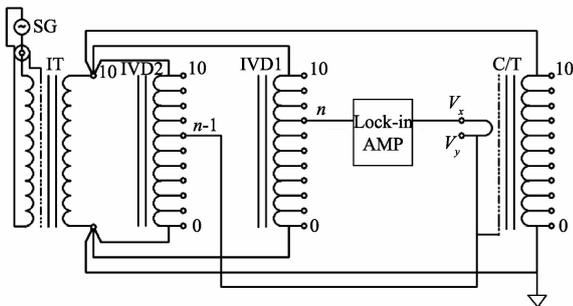


图 1 汤普森方法校准感应分压器的简化电路

### 1) 校准用分压器

校准变压器是一个单级铁芯,带二次绕组的电压比例变压器/感应分压器<sup>[6]</sup>。由于应用于小电压下,电磁激励方式采用自激式。一次绕组线圈均匀绕制在铁芯上并保证匝数为 10 的整数倍,以便它可以作为一个 10 : 1 的感应分压器<sup>[7]</sup>。按照汤普森方法的要求,二次绕组的匝数为一次绕组的 1/10,两次绕组之间保证绝缘。二次绕组用一个全封闭的铜网隔离,这样可以在校准过程中连接到外部 guard 端以提高校准精度。校准用分压器设计了一个铜壳以提供屏蔽。

### 2) 主分压器/辅助分压器

主分压器和辅助分压器是两个结构相同的可以提供 10 段电压比例的自感式分压器。该类分压器由 10 股绞合线绕制在一个磁密度很高的铁芯上而成。绕制完成的 10 股绞合线的每两段首位相连并抽头以实现不同电位下的 10 : 1 分压功能。和校准用分压器类似,主分压器和辅助分压器也固定在为其专门设计的铜壳中进行屏蔽,从而消除空间杂散磁场的干扰。

### 3) 接口和隔离分压器

分压器接口设计采用 N 型连接头和点子继电器开关。N 型接口可以隔绝输入干扰信号,使信号间互相干扰减少,且信号带宽大,可达到更佳信号响应效果<sup>[8]</sup>。隔离分压器采用双绞线绕制而成。不同频段的隔离分压器的磁芯选用和绕制圈数分别和该频段的其他分压器所对应。

### 4) 自校准方法过程和方法

用汤普森方法对主分压器进行自校准,分步分别得到校准用分压器 C/T 的误差和主分压器的分段误差<sup>[9]</sup>。自校的程序如下:

① 自下而上,从第一段到第十段按回路平衡方程逐段测出差值  $\Delta_i$ ;

② 建立各段电势与参考绕组电势的平衡方程:

$$\delta_i - \Delta E_x = \Delta_i \quad (1)$$

式中: $\Delta E_x$  为参考电势偏差(即参考电势绕组电势与被测感应电势十段平均电势的差值); $\Delta_i$  为微差补偿器的读数  $\pm \alpha$  及  $\pm \beta$ (即在平衡回路中补偿电势  $\Delta_i \pm \alpha \pm \beta$ )。

③ 十次的平衡方程累加,得:

$$\sum_{i=1}^{10} \delta_i - 10 \Delta E_x = \sum_{i=0}^{10} \Delta_i \quad (2)$$

④ 感应分压器的结构特点可知:

$$\sum_{i=1}^{10} \delta_i = 0, \text{ 于是可以求得:}$$

$$\Delta E_x = \frac{\sum_{i=0}^{10} \Delta_i}{10} \quad (3)$$

⑤ 逐段平衡时微差补偿器的读数是已知的,把上式中的  $\Delta E_x$  代入每次的误差平衡公式,求得各段的段误差。

$$\delta_j = \Delta_j - \frac{\sum_{i=0}^{10} \Delta_i}{10} \quad (4)$$

⑥各抽头的误差可以按下式计算:

$$\Delta D_i = \sum_1^i \delta_i \quad (5)$$

经过多次(6次)测量,本套分压器在1 kHz、100 kHz、200 kHz、500 kHz、1 MHz这几个点的参考电势偏差 $\Delta E_i$ 以及第一段抽头误差 $\delta_2$ 的平均值如表2所示。在测量过程中发现锁相放大器段读数和输入电压成线性关系,表2给出了100 mV下锁相放大器的测量结果。

表2 100 mV下感应分压器的校准数据

频率/Hz	1 k	100 k	200 k	500 k	1M
$\Delta E_i/\mu V$	0.9	11.5	33.7	9.04	38.4
$\Delta \delta_i/\mu V$	1.4	1.3	4.3	28.7	32.3

根据感应分压器的检定规程,感应分压器折算到输入端到传递比例误差的相对值为抽头误差比输出端电压端理论值(在这里为10 mV)。由此可以得到每次测量的比例误差的相对值及其平均值。根据贝塞尔公式 $U_A =$

$$S/\sqrt{n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad \text{得到本套感应分压器在}$$

100 mV时在1 kHz、100 kHz、200 kHz、500 kHz以及1 MHz的A类不确定度如表3所示。

表3 输入100 mV时感应分压器的比差相对值和误差的A类不确定度

频率/Hz	1k	100k	200k	500k	1M
比差	$1.4e^{-4}$	$1.3e^{-4}$	$4.3e^{-4}$	$2.9e^{-3}$	$3.2e^{-3}$
$U_A$	$1.3e^{-5}$	$2.1e^{-5}$	$7.03e^{-5}$	$1.02e^{-4}$	$2.96e^{-4}$

由于各种原因,除了测量值引入的误差之外,校验网络还不可避免的存在一些其他的误差<sup>[10]</sup>。这些误差主要来源是:

1)线路引入的设计误差:线路引入的设计误差是校验系统的误差来源之一,由经验估算该误差分量引入的误差大约为 $2 \times 10^{-11}$ 。

2)分压器压器的外屏蔽盒与地之间的容性泄露引起的误差:分压器的外屏蔽盒和地之间存在一定的分布电容,因此在这之间会产生容性泄漏,该误差值的大小随频率成平方变化。若估计这个电容为5 pF,杂散互感的不均匀值为0.01  $\mu H$ ,那么在1 kHz、100 kHz、200 kHz、500 kHz、1 MHz时这个分量引入的误差分别为 $2 \times 10^{-12}$ 、 $2 \times 10^{-8}$ 、 $8 \times 10^{-8}$ 、 $5 \times 10^{-7}$ 、 $2 \times 10^{-6}$ 。

3)锁相放大器引入的误差:由于锁相放大器的性能所限,校验分辨率只能达到 $1 \times 10^{-10}$ ,因此对校验结果引入 $1 \times 10^{-10}$ 的不确定度,如果能进一步提高锁相放大器的性能,将减小该项的误差。

4)校正网络的电压效应误差:感应分压器的校正网络是通过互感M耦合到主回路中,因此产生互感的磁环会发生一定的电压效应<sup>[11]</sup>。有关的实验表明这一影响所引起的误差不超过 $1 \times 10^{-10}$ 。

按照均匀分布处理,可得B类不确定度分量值 $U_B$ 。由此可计算出扩展不确定度<sup>[12]</sup> $U(k=2)$ ,如表4所示。

表4 输入100 mV时感应分压器的比差的B类不确定度和扩展不确定度

频率	1 kHz	100 kHz	200 kHz	500 kHz	1 MHz
$U_B$	$8.24e^{-11}$	$1.15e^{-8}$	$4.62e^{-8}$	$2.89e^{-7}$	$1.15e^{-6}$
$U$	$2.31e^{-5}$	$4.5e^{-5}$	$8.03e^{-5}$	$2.02e^{-4}$	$4.2e^{-4}$

从上述数据可以看出,本套分压器运行稳定,分压效果良好。不确定度满足量传需求。

## 4 结 论

介绍了国内的交直流转换溯源技术的现状,感应分压器在交直流溯源技术量程扩展上的应用以及工频下基于汤普森方法校准10:1感应分压器的设计和构造。描述了一个可抬高电位的10:1自感式感应分压器和带有二次绕组的,在校准过程中被用做电压标准的校准用分压器。校正电路采用隔离分压器的设计隔离了输入输出电压,降低了校准用分压器的磁误差。N型连接头和隔离分压器的选用提高了自校系统的校准精度和稳定性。应用汤普森方法自校准的感应分压器结果稳定,精度良好,满足溯源的量传需求。

## 参 考 文 献

- [1] 钟青,张江涛,贺青. 交直流热电转换器的发展与研制[M]. 第四届全国电磁计量大会文集,2007:9.
- [2] 张建永,贾云涛,岳伟. 一种测量脉冲大电流的改进分流器设计[J]. 电子测量技术,2003,33(6):25-28.
- [3] KOCHAV K, WOOD B. Transformer calibration at NRC using thompson's method[J]. Workshop and Symposium,2008(8):1-2.
- [4] 陆文骏. 十进感应分压器的误差综合[C]. 第四届全国电磁计量大会文集,2007:9.
- [5] 侯德鑫,徐浩,邱建,等. 铁氧体裂纹检测自相关处理与多特征辨识方法[J]. 仪器仪表学报,2014,35(1):117-124.
- [6] BRANISLAV D. Calibration of 10:-1 Inductive Voltage Dividers by Thompson's Method Using an Electronically-Enhanced Three-Stage Calibrating Transformer[J]. IEEE Conference on Precision electromagnetic Measurements 2012:500-501.
- [7] 张振,徐科军,杨双龙,等. 具有快速响应的电磁流量计高低压励磁系统[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(6):562-571.

(下转第87页)

能化、多样化功能。

### 参 考 文 献

- [1] 张利,袁猛,卫星,等. RFID多碰撞位联合锁位动态可调整算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8):773-780.
- [2] YU J X, LIU K H, SHI W. RFID localization algorithm based on multi-hop neighborhood [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33 (12): 2681-2687.
- [3] 张玉杰,惠洒乐. 嵌入式无线网关系统设计[J]. 自动化仪表, 2012, 33(12):71-73,76.
- [4] 王战备. 基于 ZigBee 的农田信息监测网络设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8):42-45.
- [5] 焦尚彬,宋丹,张青,等. 基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿监测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5):436-442.
- [6] 赵苍荣,郑森森. 一种 RFID 智能传感电子标签的设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(4):1024-1026.
- [7] 姬五胜,郭宏,张丰臣. 基于 ZigBee 技术的无线 RFID 读写系统[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(3): 106-110.
- [8] 沈建华,杨艳琴,翟晓曙,等. MSP430 系列 16 位超低

功耗单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

- [9] 杨玲,徐曼. 基于 ZigBee 技术的无线射频识别系统硬件设计[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(3): 65-68.
- [10] 余瑞驰,苗澎,尹晓伟,等. 一种低功耗有源射频识别系统的设计[J]. 现代雷达, 2012, 34(12):12-15,19.
- [11] 姜钧严,郭艳玲,杨冬霞,等. 基于 ZigBee 技术的温室温湿度检测系统[J]. 森林工程, 2014, 30(2):105-108.
- [12] 马宏锋,李祥林,胡玫,等. 森林火灾无线监测预警系统的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2011, 32(12):39 - 42,46.

### 作 者 简 介

**杜军**, 1989 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电子信息技术。

E-mail: dujunniu@foxmail.com

**马俊**, 1973 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为电子信息技术、无线电与智能系统、磁悬浮技术。

**周亚强**, 1989 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电子信息技术。

(上接第 74 页)

- [8] POGLIANO U, BOSCO C G, LANZILLOTTI M. Calibration of a wideband transformer for measurement in the millivolt range by means of AC-AC transfer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(2): 543-546.
- [9] 张江涛,赵毅,许晨. 二进制感应分压器的自校准及其在量程扩展中的应用[C]. 第四届全国电磁计量大会论文集, 2007.
- [10] 屠治国,王薇,高金伟. 低电压交直流转换仪器的几种溯源方法[C]. 国防计量测试学术交流会论文集, 2012.
- [11] TIAN G Y, ZHOU X Y, ADEWALE I D. Pulsed

electromagnetic non-destructive evaluation and applications [J]. Instrumentation, 2014, 1(1): 15-28.

- [12] 胡军. 一种微电流测量方法的研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4):31-35.

### 作 者 简 介

**杭标**, 1989 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为仪器、科学技术专业。

E-mail: vs-powership@163.com