

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.02.08

一种大电流测量系统的设计与应用

张建永, 贾云涛, 胡耀元, 岳伟, 张胜强

(北京无线电计量测试研究所, 北京 100039)

摘要: 针对高频大电流的应用校准需求, 提出了一种采用盘式分流器的大电流测试系统。盘式分流器结构采用同轴结构屏蔽外部干扰、减小趋肤效应, 选用紫铜金属材料散热性能好, 选用宽频大功率电阻减小温度漂移。数据采集卡高速采样可对 100 A, 10 kHz 电流相关参数进行精确测量。实验结果证明, 该系统稳定性好, 测量准确度高, 可以满足高频大电流测试需求。

关键词: 大电流; 盘式分流器; 数据采集卡

中图分类号: TB97

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)02-0030-04

Design and Application of Measurement System of Large Current

ZHANG Jianyong, JIA Yuntao, HU Yaoyuan, YUE Wei, ZHANG Shengqiang

(Beijing Institute of Radio Metrology & Measurement, Beijing 100039, China)

Abstract: According to the demand of high frequency and large current calibration, this paper proposed a large current test system using disc shunt. The disc shunt structure shields external interference and reduces the skin effect with coaxial structure, has a good heat dissipation with copper metal material, and uses broadband high power resistance to reduce temperature drift. The data acquisition card of high speed sampling has an accurate measurement on the 100 A, 10 kHz current related parameters. It is proved by the experimental results that the system has good stability, high measuring accuracy, and can meet the test requirements of high frequency and high current.

Key words: large current; disc-type shunt; data acquisition card

0 引言

随着能量消耗的不断增加和利用效率的提高, 大电流技术成为能量的产生、传输、释放、控制方面的一个新兴领域, 并被广泛应用在电力、电化学、核能技术、强磁场产生技术、脉冲功率技术等多个高端技术领域^[1-3]。

大电流测量系统一般从被测电流的回路开始, 利用传感器测得比例的电压, 经过高频传回路到测量仪器。传感器是大电流测量的关键部件, 其特性决定了测量的准确性。大电流测量用传感器主要有霍尔元件、Rogowski 线圈、分流器等^[4-5]。

分流器测量交流、脉冲大电流精度高, 阶跃响应特性好, 使用简便, 参数稳定。但大电流中瞬变量的频率较高时, 分流器的趋肤效应对测量结果产生较大误差。分流器本质是一个稳定的电阻, 其中的残余

电感会对后端采样测量电压有影响。同轴盘式分流器一般都指制成平面型的盘式电阻器。同轴盘式分流器具有很好的低感特性, 其阶跃响应上升时间可以达到 ns 级。电阻材料可采用碳膜或金属, 通常安装在同轴传输线的末端, 由盘的中心及边缘取出电压信号, 然后经由高频同轴电缆把信号传至测量端^[6]。

基于以上现状, 设计了一种盘式分流器, 与 CS1622 数据采集卡结合组建了大电流测量系统。该系统中盘式分流器阻值为 $0.01\ \Omega$, 可用于测量 50 Hz ~ 10 kHz, 1 ~ 100 A 交流、脉冲电流。数据采集卡可实时显示电流波形, 测量准确度达到 0.1%。系统对于大电流精确计量有重要的意义。

1 盘式分流器的设计

1.1 盘式分流器的原理

设定电阻材料的导磁率为 μ , 电阻率为 ρ 。电流从圆盘的中心到达分流器时开始穿过电阻膜, 对称地由中心向四周流动, 电流密度均匀。这一过程与电磁波沿传输线传播类似。电感分析图见图 1。

收稿日期: 2015-01-27; 修回日期: 2015-03-12

作者简介: 张建永(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电学计量科研和测试工作。

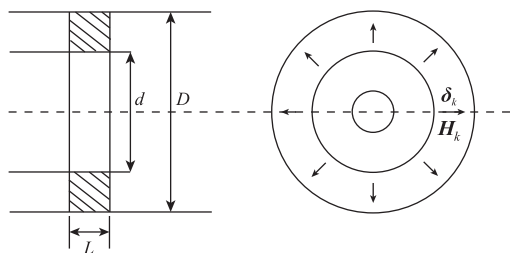


图1 盘式分流器的电感分析图

电流密度 δ_k 在圆盘上均匀分布。设与电流密度 δ_k 相交链的磁场密度为 H_k ，则有

$$\oint H_k dl = \sum \delta_k = 0 \quad (1)$$

$$H_k = 0, B = 0 \quad (2)$$

即径向电流不形成电感。

当电流沿厚度方向流动时，根据安培环路定律

$$i = \oint H dl = H \times 2\pi r \quad (3)$$

$$\text{则} \quad H = \frac{i}{2\pi r} \quad (4)$$

$$B = \mu H = \frac{\mu}{2\pi r} i \quad (5)$$

得到

$$\varphi = \oint_{d/2}^{D/2} B ds = \oint_r^R B ds = \oint_r^R \frac{\mu L}{2\pi} \times \frac{i}{r} dr = \frac{\mu L}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \quad (6)$$

电感量

$$R_L = \frac{\varphi}{i} = \frac{\mu L}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \quad (7)$$

式中： D 为电阻片的外部直径； d 为内部直径； L 为电阻片厚度。对于非磁性的金属电阻膜， $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，金属薄膜的厚度为 cm 数量级时，电感 R_L 的范围： $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{H}$ 。

可见，盘式分流器只有沿厚度方向有电感，且电感值相对较小^[7-9]。

另可计算得到盘式分流器的方波上升时间公式为^[10]

$$t_r = 2.28T = 2.28 \frac{uL^2}{\rho\pi^2}$$

有 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，铜的电阻率 $\rho = 1.75 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ，当 $L = 10 \mu\text{m}$ ， $t_r = 1.7 \text{ns}$ 。可见，有很好的频率响应特性。

1.2 盘式分流器的结构设计

盘式分流器一般为薄膜金属圆盘（环状圆盘），内外边缘可作为电流的输入端（例如，内外边缘分别连接同轴电缆末端的内外导体），同时也作为测量端。电流在薄的电阻盘中径向均匀流动，测量信号受杂散电感

影响很小，适用于测量快速变化的电流。盘式分流器也可由大量小阻值电阻并联组成，电阻的一端在圆心相连，另一端连接成圆盘的外环。

本文采用全金属材料、并联宽频大功率小电阻设计了一种盘式分流器。盘式分流器主要包括依次连接的上面板、紫铜圆盘、电阻和下面板。上面板输入端的丁头正端与紫铜圆盘中心孔通过电路焊接连接；紫铜圆盘边缘与 12 个电阻电路焊接连接，电阻另一端焊接到下面板边缘；紫铜圆盘中心孔与下面板的输出端 N 型头的正端电路焊接连接。盘式分流器结构效果图如图 2 所示。

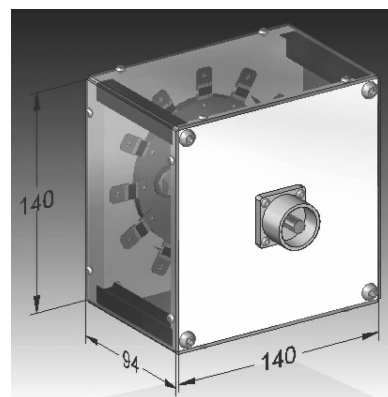


图2 盘式分流器结构图

上面板结构如图 3 所示。上面板由两部分组成，两部分之间为机械螺丝连接，方便组装。上面板整体为长方体，中心凹进为圆柱体。上面板正面连接同轴丁头，丁头的负端与上面板整体导通。上面板圆柱体边缘留有等分的 12 个凹进去的长方体，为电阻焊接留下足够的空间。

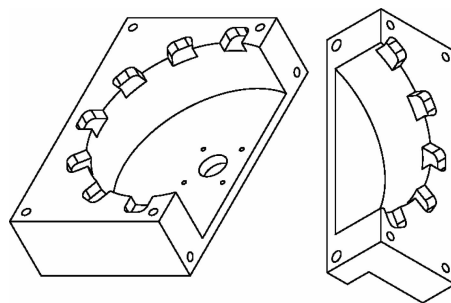


图3 上面板结构图

紫铜圆盘结构如图 4 所示。紫铜圆盘的中心孔与上面板丁头的正端、下面板 N 型头的正端通过铜线电路焊接在一起。紫铜圆盘的边缘有等分的 12 个圆孔用来固定和电路焊接的 12 个电阻。紫铜圆盘上还有 2 个固定通孔，用绝缘螺丝固定在下面板上。

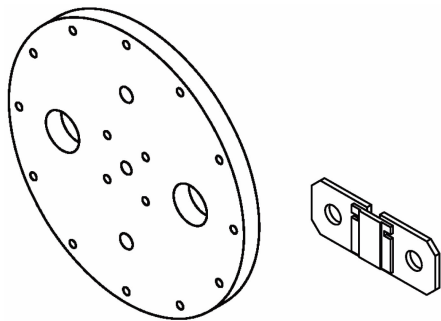


图 4 紫铜圆盘、电阻结构图

电阻的组装方式如图 4 所示。先在紫铜圆盘和下面板的 12 个圆孔上螺丝固定紫铜片，再将电阻一边焊接在紫铜圆盘的固定紫铜片上，另一边焊接在下面板的固定紫铜片上。

下面板结构如图 5 所示。下面板正面连接同轴 N 型头，N 型头的负端与下面板整体导通，N 型头正端与紫铜圆盘中心孔相连。

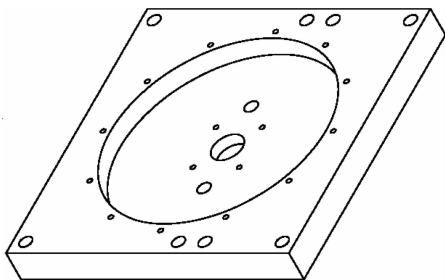


图 5 下面板结构图

盘式分流器实物图见图 6。其中大电流由前面板的丁头输入，经过丁头正端流到紫铜圆盘，经过 12 路电阻到下面板，下面板与上面板是相通的，电流回到上面板，即丁头负端，形成回路。下面板的 N 型头正端从紫铜圆盘电阻端、负端从下面板采取电压信号。此盘式分流器即可实现将大电流转化为电压进行测量。

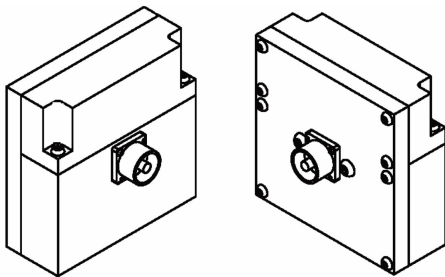


图 6 盘式分流器实物图

1.3 盘式分流器特点

电阻为 VISHAY 公司的 CSM 系列电阻，阻值为 $0.12\ \Omega$ ，可通过最大电流为 10 A 或者功率为 20 W。

此盘式分流器具有以下优点：

1) 电阻排列及接口设计均用同轴结构，对称性好，外部采用金属圆桶，能减少分布参数影响，屏蔽杂散磁场，趋肤效应好。信号经同轴接口输出，失真度小；

2) 各部件由紫铜制成，表面镀银，导电性好，整体结构都为金属材料，散热性好，能长时间测量而不影响测量精度；

3) 采用大功率、频带宽的稳定电阻，长时间通过电流不会因过度发热而导致电阻值发生改变并影响测量数据。

1.4 数据采集卡

测试系统中的电压频率最高达到 10 kHz，其波形持续时间短，很难精确测量。为此我们选定美国 Dynamic System 公司型号为 CS1622 的高速数据采集卡，其采样速率达到 200 MS/s，带宽 125 MHz，分辨力为 16 位。高速数据采集卡采用 SMA 接口，由同轴屏蔽线接到阻抗匹配连接器电压端 N 型接口，减小了高频信号传输的损耗和电磁干扰。测量程序采用多次测量取平均值，同时清除噪声干扰，保证测量数据准确可靠。

2 系统组建和测量结果分析

盘式分流器的直流阻值按照直流标准电阻采用直流电流比较仪式电桥校准。其交流电阻采用比较法测量，即标准交流电流源输出稳定电流依次通过盘式分流器和标准分流器 A40B，测量两个分流器上电压，因相同电流可由分流器 A40B 阻值计算得到盘式分流器交流阻值。

盘式分流器经计量校准不同频率点阻值如表 1 所示。其中不同频率下盘式分流器的阻值相对变化最大为 1.5×10^{-4} ，可以看出盘式分流器频带很宽，符合大电流的校准要求。

表 1 盘式分流器 100 A 时频率阻值

频率	阻值 / $\text{m}\Omega$	与 DC 差值 / $\text{m}\Omega$	测量不确定度/ $\text{m}\Omega$
DC	10.003450	/	
50 Hz	10.003818	0.000368	
400 Hz	10.003667	0.000217	4×10^{-4}
1 kHz	10.003981	0.000531	
10 kHz	10.004607	0.001157	

测试系统由超级大电流源 52120A/脉冲电流源 LDI-928-25 输出大电流，经过盘式分流器由数据采集卡测得电压，计算得到电流值。系统连接图见图 7。

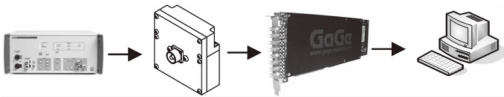


图7 系统连接图

数据采集卡 CS1622 有软件 GagaScope，可以设置采样速率、耦合方式等，直接测量有效值、幅值、上升时间、周期等量值，见图 8。

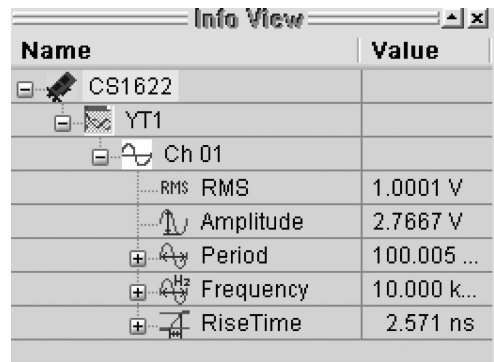


图8 测量量值显示

实验中超级大电流源 52120A 输出 100 A，10 kHz 电流，经过分流器转化为电压，在数据采集卡软件中显示的波形如图 9 所示。

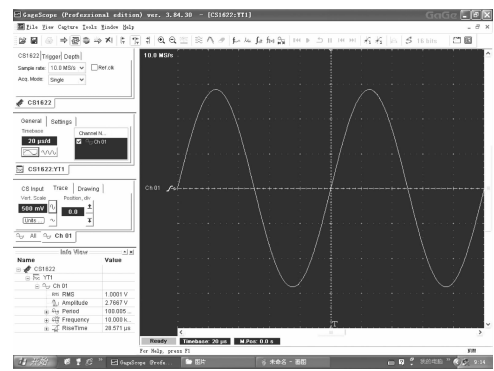


图9 实验结果波形图

经过计算交流电流的数据如表 2 所示，标准偏差为 $s_n(\bar{x}) = 7.4 \times 10^{-5}$ A。交流电流测量不确定度主要有盘式分流器引入的分量、数据采集卡引入的分量、电流源不稳定引入的分量等组成^[11]，计算 100 A，10 kHz 交流电流测量不确定度为 1×10^{-3} 。

3 结论

设计了一种宽频大电流盘式分流器，建立了大电流测试系统，可对 100 A，10 kHz 电流的有效值、幅值、周期、上升时间等参数进行精确测量。盘式分流器采用同轴结构，屏蔽了外部干扰，趋肤效应小；紫

铜金属材料散热性能好，适合大电流测量；选用宽频大功率电阻温度漂移小，稳定性好。系统采用高速数据采集卡测量各种参数，测量准确度高，便于大电流测试。

表 2 100 A，10 kHz 交流电流测量结果

次数	结果/A	均值/A	标准偏差/A
1	100.02	100.011	7.4×10^{-5}
2	100.01		
3	100.01		
4	100.02		
5	100.01		
6	100.01		
7	100.02		
8	100.00		
9	100.01		
10	100.00		

参 考 文 献

[1] LU Wenke, ZHU Changchun, LIU Junhua, ZHANG Jianjun. Study of wavelet transform type high-current transformer [J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2002 (2): 75-79.

[2] 揭秉信. 大电流测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

[3] 陈国呈. 大电流能量技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[4] Munoz F J, Torres M, Munoz J V, et al. Monitoring Array Output Current and Voltage in Stand Alone Photovoltaics Systems With Pulse Width Modulated Charge Regulators [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2013, 135 (2): 021008-1-021008-9.

[5] 徐雁, 张德会, 姚军. 高频大电流测量[J]. 电测与仪表, 2007, 44(494): 10-12.

[6] 张江涛, 田锋, 潘仙林, 等. 交流高频大电流国家基准的建立[J]. 中国计量, 2011(6): 68-71.

[7] 薛晔. 用外部补偿改善分流器的响应特性[J]. 高压电器, 2010(5): 71-71.

[8] 黄德宝, 王文昌, 卫玲. 强流 ns 同轴分流器及其强度分析[J]. 原子能科学技术, 1989, 23(2): 16-23.

[9] Nicholas J Georgiadis, Donald P Rizzetta, Christer Fureby. Large-Eddy Simulation: Current Capabilities, Recommended Practices, and Future Research[J]. AIAA Journal, 2010, 48 (8): 1772-1784.

[10] 余存仪, 余德明. 盘式分流器的研制[J]. 高压电器, 1990 (5): 22-24.

[11] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.