

基于直流测试法的高频磁芯损耗 测量电路的设计

The Design of Measurement Circuit of Magnetic Core High-Frequency Loss Based on DC Test Method

柳百毅, 陈为, 汪晶慧

福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108

摘要: 厂家提供的磁性元件的损耗数据都是在正弦波激励下测得的, 而功率变换装置中磁性元件工作在各种 PWM 波励磁下。为测得磁性元件在实际励磁工况下的磁芯损耗, 本文在直流法的基础上提出差值法的测量思想, 可以省去定标的工作。经过与量热法的测量结果相比较, 最大误差为 7%, 能够满足工程应用的要求。

关键词: 磁芯损耗, 直流法, 上位机, DSP

中图分类号: TM4 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2015)08-4-101

1 引言

现今, 磁性元件的运用越来越广泛, 功率变换装置也朝着高频化、平面化、集成化的方向发展。要实现其在实践中能够高效的运行, 就得对其进行建模, 以便了解其相关特性, 而这其中所需要的数据就得通过对其磁芯损耗进行精确的测量^{[1][2]}。

现有对于磁芯损耗测量的方法主要有交流功率计法、量热计法以及直流法等, 但交流法不适合测量高阻抗角的磁件, 量热计法的测量时间较长, 并且现今学界对于直流法的研究较少, 故采用直流法测量磁芯损耗具有很大的工程运用价值和理论意义。本文将通过如何建立直流法测量装置做出详细介绍, 完成整个装置的设计主要包括硬件电路设计、DSP 程序编写和上位机程序编写三个部分。

2 直流法原理

直流法原理图如下图 1 所示, 直流法顾名思义就是通过测量直流功率, 然后通过相关的数据处理得到磁件的磁芯损耗^[3-6]。根据能量守恒可以知道, 装置的输入功率 P_{in} 等于装置的额外损耗 P_{ex} 加上磁件上的损耗 P_L , 当装置的额外损耗 P_{ex} 很小时, 可以认为装置的输入功率约等于磁件上的损耗。装置的额外损耗主要包括开关管的导通损耗、关断损耗、开关损耗, 线路中导线的损耗以及输入滤波电容和输出隔直电容的 ESR 损耗等, 可通过电路优化设计降低 P_{ex} , 选择导通电阻小的开关管降低导通损耗; 采取零电压导通方式降低其开关损耗; 通过并联多个电容的方式来降低电容上的 ESR 损耗。但是这些措施只是降低了装置的额外损耗, 要提高装置测量的精度, 其是不能忽略的, 但是可以用定标的方法来扣除。如下式 (1) 和式 (2) 所示

$$P_{in} = P_{ex} + P_L \quad (1)$$

$$P_{ex} = \alpha \cdot I_{pk}^2 + \beta \cdot f \cdot U_{in} \cdot I_{pk} \quad (2)$$

其中 α 、 β 是常数; I_{pk} 是输出峰值电流大小; U_{in} 是输入直流电压值; f 表示开关频率。根据文献 [7], 可以通过一定的实验数据拟合出 α 、 β 的值, 但是最终拟合出的 $P_{ex}-I_{pk}$ 曲线是非线性的, 这会给磁件损耗的计算带来一定的误差,

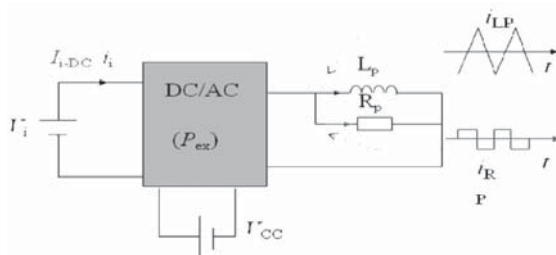


图 1 直流法原理图

且利用定标量热计法测量的磁件损耗包括绕组损耗。

因此，本文在直流法的基础上提出差值测量，其无需考虑 P_{ex} ，可以去除定标的工作。如下图 2 所示。差值测量的测量过程要分为两次，第一次测量时在主电路输出端上串接上基准磁件作为负载，第二次测量则是在负载上并上待测磁件。两次测量均满足式 (1)，如式 (3) 和式 (4) 所示：

$$P_{in1} = P_{ex1} + P_{L1} \quad (3)$$

$$P_{in2} = P_{ex2} + P_{L1} + P_{L2} \quad (4)$$

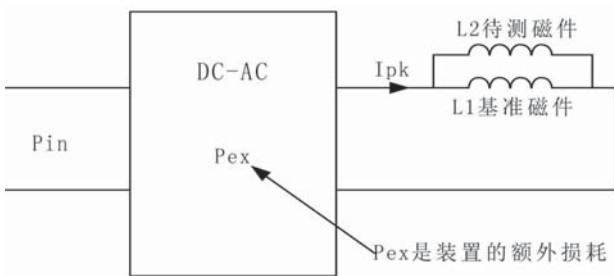


图 2 差值法分析图

差值测量的主要误差来源是两次测量时工况的差别，因此首先待测磁件的电感量需要远远大于基准磁件的电感量（按照工程上的标准，取 10 倍左右可以满足设计要求）；其次要保证装置的额外损耗 P_{ex} 较小（通过采取上述几种处理方式即可）。当待测磁件的电感量远远大于基准磁件的电感量时，并上待测磁件后，输出的峰值电流大小基本保持不变，因此在一定的频率和输入电压的情况下，两次测量前后装置的额外损耗可以保证基本不变。当输出峰值电流大小基本不变时，则流过待测磁件的电流时基本为零的，因此所测量的待测磁件的损耗是基本不包含其绕组损耗的。而保证装置的额外损耗较小，是为了降低因两式相减得到的误差（因为如果两个较大的值相减得到一个较小的值，那么这两个较大值的微小波动都会直接影响到相减后得到的值的大小）。

为了保证装置的安全可靠运行，输出磁件负载的感量受到装置中开关管的参数影响。根据开关管所能承受的最大电流值可以得到装置所能测量磁件的最小感量，根据开关管的漏源极之间结电容的大小可以确定磁件负载所能允许的最大感量（要求开关管零电压开通）。如式 (5) 和式 (6) 所示：

$$L_{min} = \frac{U_{in} \cdot D \cdot T}{2 \cdot I_{pk}} \quad (5)$$

$$L_{max} = \frac{U \cdot D \cdot T \cdot \Delta t}{4 \cdot C_{ds} \cdot U_{in}} \quad (6)$$

式中 U 是磁件负载上的电压大小，当占空比为 0.5 时，其与输入电压 U_{in} 相等； C_{ds} 是开关管漏源极之间结电容大小； Δt 是开关管关断后负载的续流时间。如果在测量的过程中，磁件负载的感量没有在上述要求之内，则会造成电路运行不正常。当磁件的感量太小时，会造成输出峰值电流太大，从而可能烧毁开关管；如果磁件感量太大，则不能满足开关管零电压开通，容易造成输出波形发生畸变（因为如果负载续流时间太长，会影响输出负载波形的占空比）。

3 装置设计思路

如图 3 所示是本文设计的总体方案^[8]。主要是通过上位机与 DSP 进行通信，实现一个人机交互的环节。然后再通过 DSP 控制电路控制硬件电路的其他部分进行相关的运作。

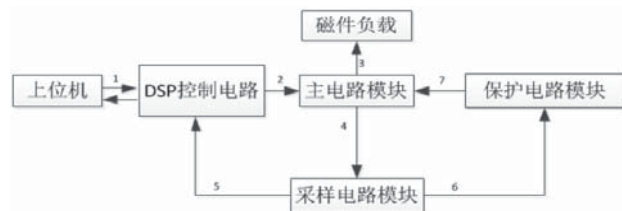


图 3 总体设计方案

图 3 中的路径 1 表示实现上位机控制 DSP，DSP 将数据反馈给上位机；2 表示 DSP 控制主电路的工作状态；3 表示逆变器输出串接负载；4 表示输入电压、电流以及隔离电容电压采样；5 表示采样值反馈给 DSP；6 表示采样值反馈给保护电路；7 表示主电路故障时，保护电路会关断主电路。

4 软件程序的编写

软件程序的编写包括上位机和 DSP 两部分程序。主要是为了实现上位机与 DSP 进行通信，通过 DSP 控制硬件电路进行相关的操作，从而实现一个人机交互的效果。

DSP 程序的流程如图 4 所示，即先接收来自上位机发送的数据，然后对这个数据进行校验，校验判断数据接收正确后，再根据不同的指令数据执行不同的子过程。

上位机程序是用 Visual Basic.Net 语言编写的，其总体程序流程如图 5 所示。主要是通过与不同的下位机进行通

信，然后对通信后的数据进行处理的一个过程（其中启用 FLUKE 通信是指启用电表通信）。

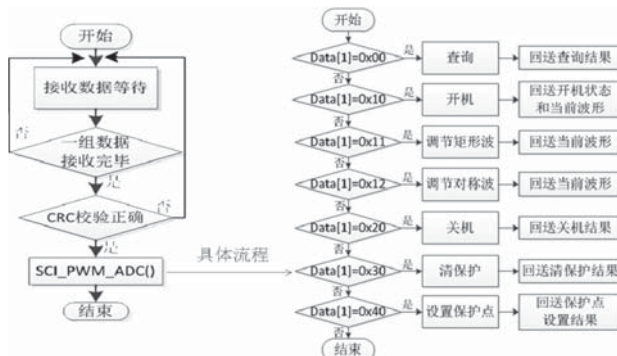


图 4 DSP 程序总体框架

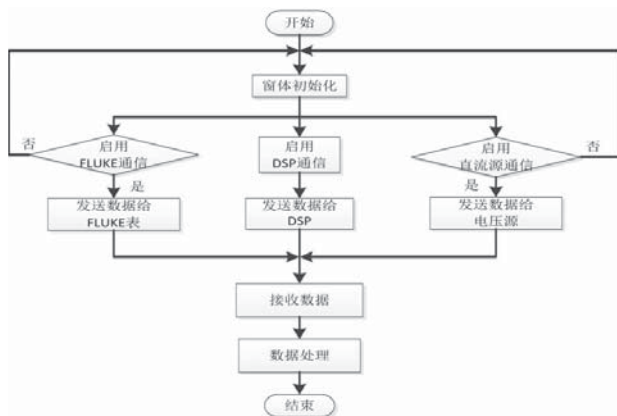


图 5 上位机总体程序框架

5 系统功能的实现

整个系统功能的实现主要体现在上位机界面（图 6 是上位机的总体界面），包括保护点设置、开机、关机、PWM 波调整、清保护、查询等功能。其中执行查询功能时，要进行两次才能够计算磁芯损耗的值（符合差值法的思想）。而 PWM 波调整是对 DSP 输出 PWM 波进行波形、频率、占空比以及死区时间的调整。

如图 7 所示，是本文测量过程中所运用到到的仪器设备。主要包括两台电表、一台直流源、一台示波器、电脑和高频磁芯损耗测量装置。

其各部分之间的联系如图 8 所示，其中测量装置已包含对主电路的电压和电流采样的功能，而所设置的电压表

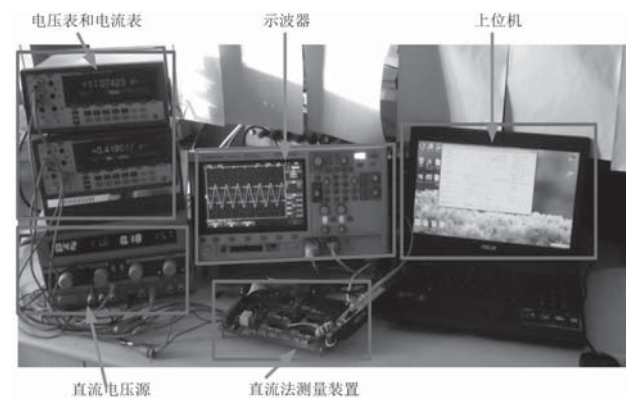


图 7 测量装置和设备

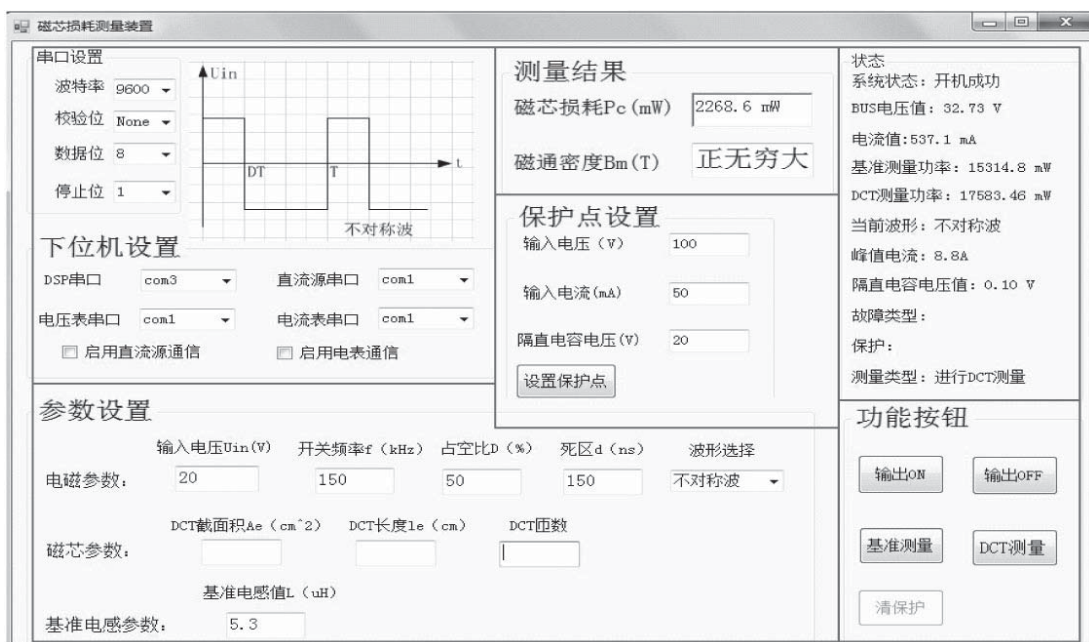


图 6 上位机总体界面

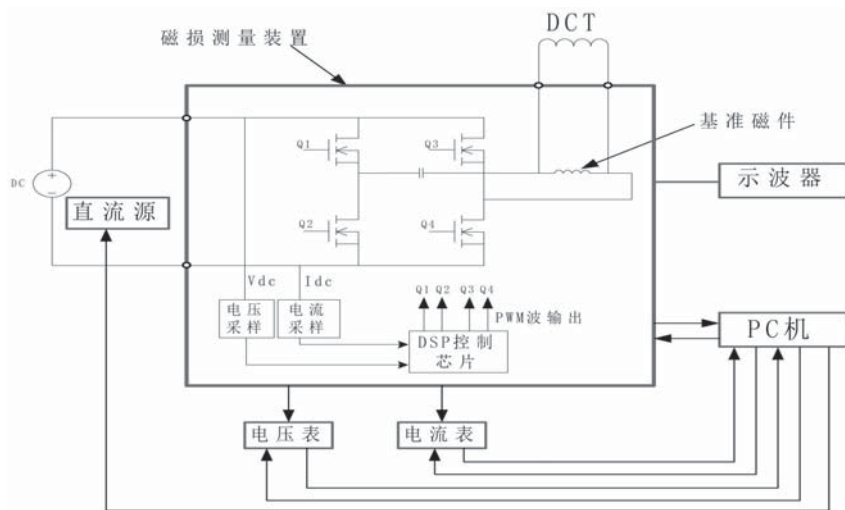


图8 测量仪器之间的联系图

和电流表是 FLUKE-8845A 电表，具有 6 位半的测量精度，主要是为了验证电路中采样的精度；示波器主要是为了检测电路中的电压、电流波形；直流电压源的输出电压值可以通过上位机控制来给定。

图 9、图 10 表示在不对称 PWM 波下装置输出负载上的波形情况，图 11、图 12 表示在对称 PWM 波下磁件负载上的波形情况。其中在两次测量过程中，输出负载的峰值电流的大小是近乎不变的，即可认为流过待测磁件 (DCT) 的电流近乎为 0，可见差值法的思想是可行的。

为验证装置测量数据的精度，测量装置所测得的数据通过与量热计法的测量结果进行对比（如图 13、14 所示）。其中所采用的电感是 CM229173 绕制的电感，横截面积为

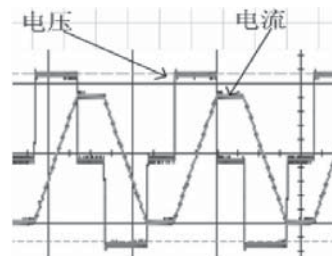


图 11 对称 PWM 波下只有基准磁件的输出波形

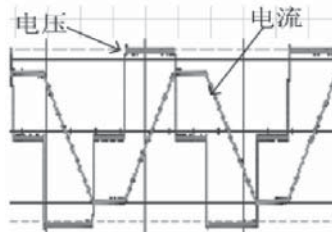


图 12 对称 PWM 波下并上待测电感的输出波形

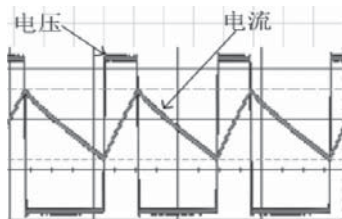


图 9 不对称 PWM 波下只有基准磁件的负载波形

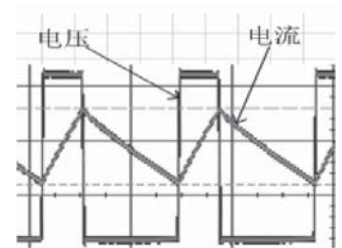


图 10 不对称 PWM 波下并上待测磁件的负载波形

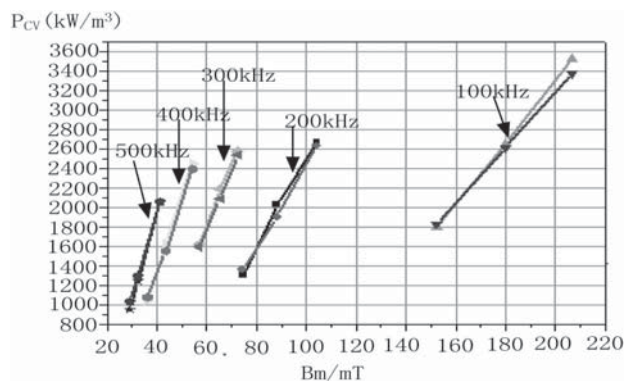


图 13 直流法与量热法测量结果对比

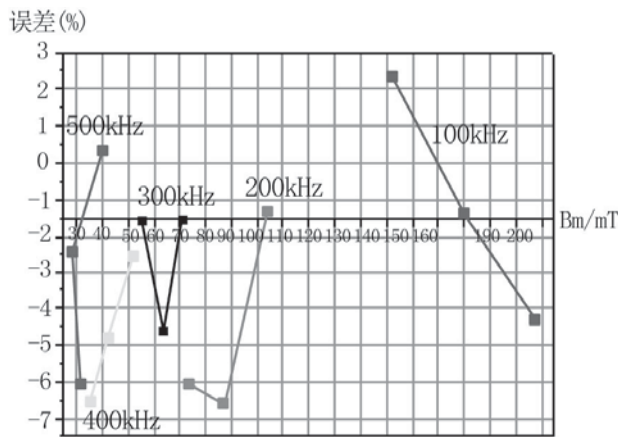


图 14 直流法测量误差

173cm², 匝数为 24 匝, 感量为 64.58uH。可以发现, 运用直流法测量磁芯损耗的结果是与量热计法的结果很接近的, 且本文设计的装置测量精度最大误差是在 7% 以内, 足以满足工程应用的要求。

6 结论

1) 本文在直流法测量磁芯高频损耗的基础上运用差值法的思想, 相比于定标法, 去除了定标的工作, 可以对各种脉宽调制激励下的高频磁芯进行精确的损耗测量。

2) 差值测量法主要适用于没有气隙的磁芯的损耗测量。

3) 针对测量系统, 设计和编制的软件程序, 可以实现

各种功能, 提高了测量的便捷性。

4) 样机测量结果与量热法测量结果比较, 误差最大误差控制在 7% 以内, 可以满足工程应用的要求。

参考文献

- [1] 陈为, 何建农. 电力电子高频磁技术及其发展趋势. 电工电能新技术. 2000, 19(2): 30-34
- [2] Bimal K. Bose. The Past, Present, and Future of Power Electronics. IEEE Industrial electronics magazine, 2009:7-14.
- [3] C.P.Steinmetz. On the law of hysteresis. AIEE Transactions, vol.9, 1892:3-64
- [4] J.E.Brittain. A Steinmetz contribution to the ac power revolution. In Proceedings of the IEEE 72(2), 1984:201-223
- [5] 汪晶慧, 陈为. 超低损耗角磁芯损耗测量的量热计法 [J]. 电工电能新技术. 2012 年, 4 期: 6-11
- [6] 汪晶慧, 陈为. 矩形波激励下磁芯损耗测量中绕组损耗测量. 南昌大学学报《工科版》. 2012 年, 3 期.
- [7] 汪晶慧. 功率变换器磁元件高频磁芯损耗测量与模型研究: [博士学位论文]. 福州: 福州大学电气工程与自动化学院电子系, 2012 年.
- [8] 杨向东. 高频磁元件磁芯损耗的测量研究: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学电气工程与自动化学院, 2014 年.

个人简介

柳百毅, 1992 年 12 月生, 在读研究生, 福州大学电气工程与自动化学院, 邮箱: 1576516471@qq.com, 联系电话: 14759168683