

高精度磁心损耗测量的比对量热法

汪晶慧, 陈开宝, 陈 为

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要:针对高效功率变换器中磁心损耗难以测量的问题,本文提出了高频磁心损耗的新测量方法——比对量热法,分析了其基本原理、误差构成以及测量系统实现。通过引入脉宽调制控制的比电阻作为参考热源,有效提高了测量精度并且改善了传统量热法测量过程的冗长繁琐。实验验证表明,比对量热法能精确测量小损耗角磁性元件的磁心损耗。

关键词:磁心损耗;量热法;比对量热法

DOI: 10.12067/ATEEE1701084 **文章编号:** 1003-3076(2018)04-0083-06 **中图分类号:** TM315

1 引言

磁心损耗精确测量为磁心损耗建模提供数据来源和验证手段,从而进一步为功率变换器获得高效率和高功率密度的设计提供理论依据^[1]。传统的磁心损耗测量方法为交流功率计法,其通过测量磁性元件上的感应电压和激磁电流获得磁心损耗。交流功率计法是简单快捷的电气测量法,但因其理论缺陷,在测量小损耗角磁性元件的磁心损耗时,微小的相位误差会产生很大的测量误差^[2]。

近年量热法越来越广泛应用于电机和功率电子设备的损耗测量。最早的量热法可追溯到18世纪,1789年,Lavoisier在《Elements on chemistry》中描述了量热法^[3]。最初用于电气测试的量热法用来测量大功率电机的损耗,被测电机置放在盛有热工质的隔热容器里,若已知热工质的比热容和质量,则可通过测量温升来获得损耗^[4,5]。

现有的量热法分为直接测量和间接测量。直接测量通过测量被测件所在隔热容器中热工质的温升得到被测件的损耗,其分为开放式量热法^[4,6]和封闭式量热法^[7,8]。开放式量热法是最简单的量热法,采用空气作为热工质,热响应快,但空气的比热容小且其性能不稳定,导致装置体积大且测量精度很差。封闭式量热法采用液体作为热工质,液体较气体有更大的比热容和更稳定的性能,因此装置体

积较小且精度较高,但是存在为了均匀热分布而引入的热交换器产生附加损耗的问题。间接测量通过可精确计算的参考热源损耗得到被测件的损耗,其分为平衡式量热法^[9-11]和串联式量热法^[12-14]。平衡式量热法引入参考热源重复被测件的测量过程,调节参考热源的输入功率使其温升与被测件测量时的温升相等,则参考热源的损耗就是被测件的损耗。该方法可消除散热和热交换器带来的测量误差,但需测量两次,因此测量过程冗长繁琐。串联式量热法是平衡式量热法的改进,其由两个分别放置被测件和参考热源的内部连通的相同容器构成,气体热工质依次先后流过两个容器,根据可精确计算的参考热源损耗和温升的比值得到被测件的损耗。该方法改善了平衡式量热法耗时长缺点,但两个容器的工况(内外温差)不一致会导致测量误差。

文献[15]提出分段定标量热法测量小损耗角磁性元件的磁心损耗。该方法在与被测件测量工况相同的条件下(相同环境温度、等量热工质和相同磁力搅拌器转速),测量已知功率参考热源的温升,重复实验,获得功率与温升的曲线并利用最小二乘法拟合其函数关系;然后测量所需波形、频率、幅值等激励下磁性元件的温升得到磁心损耗。分段定标量热法采用定标的方式消除了传统量热法固有的测量误差,但是定标过程和测量过程的不同步使得很难保证测量环境的一致性,且为了更精确测量损耗,

收稿日期: 2017-01-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(51277032)、福建省自然科学基金项目(2015J01191)
作者简介: 汪晶慧(1975-),女,江西籍,副教授,博士,研究方向为电力电子高频磁技术;
陈开宝(1990-),男,福建籍,硕士研究生,研究方向为电力电子高频磁技术。

改变测量工况都需重新定标,测量过程仍冗长繁琐。

针对现有量热法测量过程冗长繁琐且精度较差的问题,本文提出比对量热法测量磁心损耗,在详细分析其误差来源的基础上建立测量系统。

2 基本原理

比对量热法隶属间接量热法,原理图如图 1 所示。系统由两套装有质量相等的相同热工质且保温性能一致的隔热容器构成,两个容器中均放入被测件和参考热源。被测件在激励下产生的损耗使热工质温度升高,通过控制参考热源的输入功率,使参考热源所在隔热容器(比对容器)中的热工质温升等于被测件所在隔热容器(测量容器)的热工质温升,在热工质比热容和质量相等的条件下,通过式(1)可知两隔热容器中热源的损耗相等。

$$W = Cm\Delta T \tag{1}$$

式中, W 为损耗; C 为热工质的比热容; m 为热工质的质量; ΔT 为热工质在测量时间内的温升。因此可通过计算参考热源的损耗获得被测件的损耗。

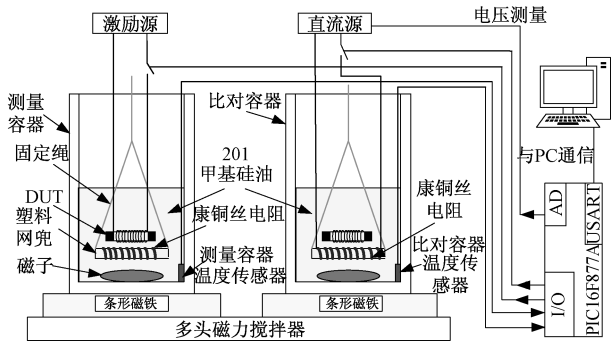


图 1 比对量热法原理图

Fig.1 Schematic diagram of comparison calorimetry method

比对量热法的关键是控制参考热源的输入功率使比对容器的热工质温升等于测量容器的热工质温升,本文提出脉宽调制控制参考热源的输入功率,其基本原理如图 2 所示。其中实线为用作参考热源控制基准的测量容器中热工质的温度曲线,虚线为比对容器中热工质的温度曲线。当比对容器中温度低于测量容器中温度下限值时开关导通,参考热源开始工作;比对容器中的温度高于比对容器中温度上限值时开关断开,参考热源停止工作。控制参考热源工作的开关的驱动波形见图 2 中的脉宽调制矩形波,参考热源的能量计算公式为:

$$W = \sum_{i=0}^n \frac{U_i^2}{R} T_{oni} \tag{2}$$

式中, W 为焦耳热; U_i 为参考电源的直流输入电压; R 为用作参考热源的电阻的阻值; T_{oni} 为第 i 次导通的导通时间; n 为开关次数。式(2)中的直流输入电压和导通时间可精确测量,性能稳定的电阻阻值也可精确确定,因此参考热源的损耗可精确计算。

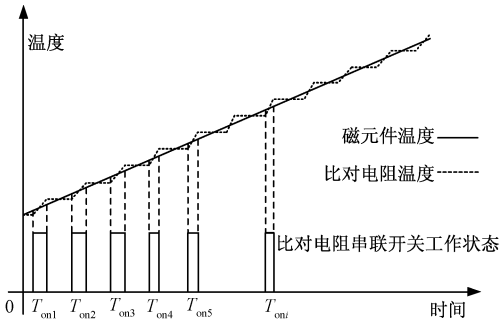


图 2 参考热源控制图

Fig.2 Control diagram of reference heat source

本文提出的比对量热法采用两套测量工况一致的隔热容器同时工作,引入可精确计算损耗的脉宽调制控制的参考热源消除传统量热法的测量误差,且无需分段定标量热法的定标测量过程,大大减少了测量时间。

3 测量系统

根据比对量热法测量原理建立测量系统,如图 3 所示。系统包括隔热容器、多头磁力搅拌器、控制箱、直流电源和上位机。隔热容器采用象印牌闷烧杯,盛有甲基硅油 201 作为热工质。室温时甲基硅油 201 的比热容为 $2.49 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 比水的比热容 $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 小。多头磁力搅拌器同步无线控制两套绝热容器的搅拌磁子,使隔热容器中的热工质热均匀分布;直流电源给参考热源供电;高精度数字万用表验证上位机获取的参考热源功率是否准确。



图 3 实验装置图

Fig.3 Experimental device diagram

两套隔热容器内悬挂的内容物如图 4 所示。测

量时被测件直接放置在塑料网兜上。为了实现温度准确跟踪和损耗精确计算,选用热滞后性小和低温度系数的直径为 0.2mm 的康铜 6J40 电阻丝制成比对电阻。

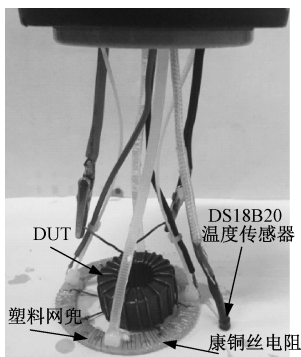


图4 网兜、比对电阻实物图

Fig. 4 Practicality picture of net and reference resistance

在测量过程中,控制箱中的控制板实时自动测量容器中热工质的温度,比对电阻电压和导通时间,实现对参考热源的脉宽调制控制,并上传测量数据至上位机,由上位机计算被测件损耗。测量系统通过控制箱和上位机相互通讯实现自动测量,测量过程简单快捷,该方法改善了传统量热法测量过程的冗长繁琐。

4 误差分析

比对量热法的主要误差来源有三个:①测量系统的散热和附加损耗;②两套隔热容器测量环境的不一致;③参考热源温度跟踪失调。

测量系统的散热主要包括通过容器内外连接导线的传导散热以及由容器内外温差产生的辐射散热。根据比对量热法的原理可知,只要保证两套隔热容器散热一致,则可消除由散热带来的测量误差。但如果散热与被测件损耗产生的热相当,则因所测损耗绝对值太小而产生较大的测量误差。为了使热工质中的热均匀分布,多头磁力搅拌器以相同的速度同步带动隔热容器中的磁子,以磁力的方式搅动热工质消除热梯度,然而磁子转动引入附加热量产生测量误差。为了检验散热和附加热量所产生的测量误差,容器中的被测件和比对电阻不加激励,磁力搅拌器以正常测量时的速度转动,在室温下工作 5min 观察两套隔热容器中的温度跟踪,结果如图 5 所示。可以看出,两套隔热容器中温度基本保持不变,可见测量系统的散热和附加损耗所产生的测量误差可忽略不计。

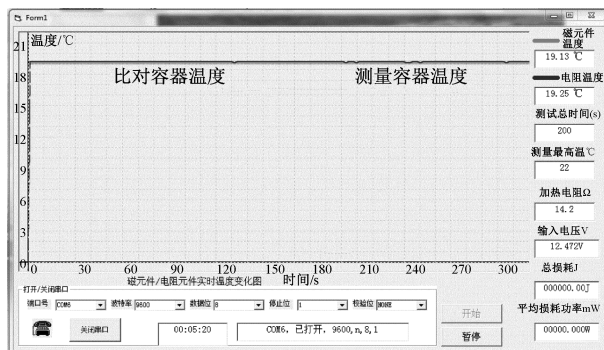


图5 装置不加热工作 5min 温度曲线

Fig. 5 Temperature curve of working for 5min without heating

量热系统中,除了热工质吸收热量外,被测件、内筒、温度计和磁子等都会吸热,且各自的吸热情况不一样,各种因素非常复杂,因此量热法中比热容的确定很困难。而比对量热法只需两套隔热容器中比热容相同,则无需精确确定比热容。两套隔热容器中内容物(磁元件、比对电阻、磁子和测温装置等)规格、位置均一致,如图 4 所示。比对容器中放置比对电阻和不工作的被测件,同时测量容器中放置被测件和不工作的比对电阻,在保证两套容器测量环境一致的前提下可认为两套容器吸收热量相等,则其比热容相等。

比对量热法引入脉宽调制控制输入功率的参考热源,当比对容器中热工质温度低于测量容器中热工质温度下限值则比对电阻加激励,当比对容器中热工质温度高于测量容器中热工质温度上限值则比对电阻不加激励。若测量结束时比对容器温度远高于测量容器温度则产生温度跟踪失调,这时测量误差很大甚至无法测量。考虑体积较大被测件的热滞后性比比对电阻的热滞后性大的情况下,测量结束前一小段时间比对电阻不加激励,测量结束后比对电阻继续跟踪一定时间直至两套容器中的温升一致。为了验证测量系统的温度跟踪情况,给被测件铝壳电阻加直流电压 7.074V,测量时间为 600s,温度跟踪如图 6 所示。可以看出,整个测量过程两个容器保持相同温差,可见温度跟踪良好。

5 精度验证

为了验证比对量热法的测量精度,选用铝壳电阻(DALE RH-10, 4.5Ω, 10W, 0.05%)作为被测件,给被测件通以直流电压(直流功率可精确计算),测量时间分别为 10min 和 5min,功率为 1~11W,结果如表 1 所示,误差曲线如图 7 和图 8 所示。从测量

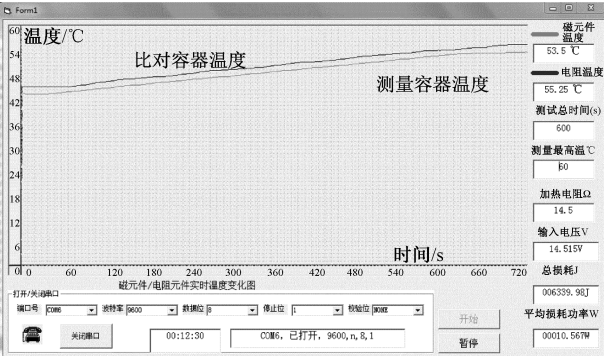


图6 温度跟踪验证曲线图

Fig.6 Curve of temperature tracking

数据可知,测量时间 10min 最大相对误差为测量 1.017W 时的 3.34%,其绝对误差为 33.97mW;测量时间 5min 时,最大相对误差是测量 6.738W 时的 -4.497%,其绝对误差为 303mW。由此可见比对量热法在测量小损耗时测量精度高。

6 比对量热法测量磁性元件磁心损耗

利用建立好的比对量热法测量系统测量磁性材料 CM229173 的磁心损耗,其激励电压是频率不同的方波,结果如图 9 所示。

表 1 精度验证测量结果

Tab.1 Measurement results of accuracy verification

测量时间/s	铝壳电阻电压/V	铝壳电阻电流/A	测量焦耳热/J	计算损耗/W	测量损耗/W	误差(%)
600	2.164	0.47	630.34	1.017	1.051	+3.34
600	3.070	0.66	1227.56	2.026	2.045	+0.94
600	3.520	0.76	1588.30	2.675	2.647	-1.05
600	4.045	0.88	2175.35	3.560	3.626	+1.85
600	4.565	0.99	2637.71	4.519	4.396	-2.72
600	5.024	1.09	3281.54	5.476	5.469	-0.13
600	5.594	1.22	4118.44	6.825	6.864	+0.57
600	6.049	1.31	4815.06	7.924	8.025	+1.27
600	6.5195	1.42	5370.91	9.257	8.951	-3.31
600	7.074	1.53	6339.98	10.823	10.566	-2.37
300	2.095	0.47	301.69	0.984	1.006	+2.236
300	2.856	0.63	552.16	1.800	1.841	+2.278
300	3.624	0.80	885.71	2.900	2.952	+1.793
300	4.104	0.91	1130.24	3.734	3.767	+0.884
300	4.745	1.05	1472.65	4.982	4.909	-1.488
300	5.213	1.16	1825.67	6.047	6.086	+0.645
300	5.523	1.22	2112.31	6.738	7.041	-4.497
300	6.058	1.33	2443.25	8.050	8.144	+1.167
300	6.609	1.47	2900.63	9.715	9.669	-0.476
300	6.954	1.54	3198.69	10.709	10.662	-1.201

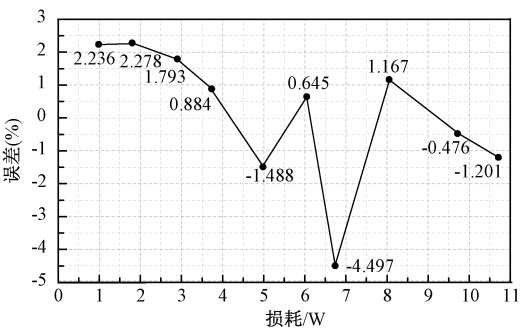


图7 铝壳电阻5min 损耗测量误差分布图

Fig.7 Error distribution map of aluminum shell resistance's loss measurement at working for 5min

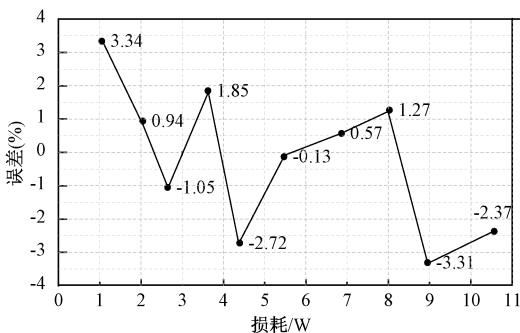


图8 铝壳电阻10min 损耗测量误差分布图

Fig.8 Error distribution map of aluminum shell resistance's loss measurement at working for 10min

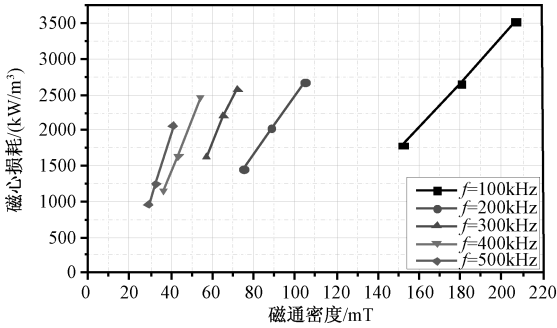


图9 CM22917 的磁心损耗

Fig.9 Core losses of CM22917

7 结论

针对高频小损耗角磁性材料磁心损耗难以精确测量的问题,本文提出了一种新型测量方法——比对量热法,引入脉宽调制控制的参考热源消除了传统量热法的测量误差。建立测量系统实现自动化测量,解决了传统量热法测量过程冗长繁琐的问题。通过直流功率已知的铝壳电阻作为被测件验证了比对量热法的精度,最大相对误差是测量 6.738W 的 -4.497%,其绝对误差为 303mW。由此可见,比对量热法在测量小损耗时测量精度高,能精确测量小损耗角磁性元件的磁心损耗。

参考文献 (References):

[1] 陈为, 余素胜, 罗恒廉, 等 (Chen Wei, Yu Susheng, Luo Henglian, et al.). 不同占空比脉冲电压激励下的高频铁芯损耗 (HF core losses under pulse excitation with different duty cycle) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 1998, 17 (4): 14-17.

[2] Mu Mingkai, Li Qiang, Gilham David, et al. New core loss measurement method for high-frequency magnetic materials [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (8): 4373-4381.

[3] 安托万·洛朗·拉瓦锡 (Lavoisier A). 化学基础论 (Elements of chemistry) [M]. 任定成 (Ren Dingcheng) 译. 北京: 北京大学出版社 (Beijing: Beijing University Press), 2008. 133-136.

[4] Aglen O. Calorimetric measurement of losses in air cooled and water cooled asynchronous motors [A]. International Conference on Engineering Materials [C]. 1996. 256-262.

[5] Bird M. Measurement of stray load losses in squirrel-cage

induction motors [J]. Electronics and Power, 1964, 10 (11): 400-401.

[6] Aarniovuori Lassi, Kosonen Antti, Niemelä Markku, et al. Applicability of an open- and balance- type calorimeter to VSC loss measurement [A]. 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications [C]. 2014. 1-8.

[7] Zúmborszky Ferenc, Tóth Dávid, Palánki Zoltán, et al. Electrical and calorimetric power loss measurements of practically ideal soft magnetic cores [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50 (4): 6300604.

[8] Szabados Barna, Mihalcea Adrian. Design and implementation of a calorimetric measurement facility for determining losses in electrical machines [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51 (5): 902-907.

[9] Turner D R, Binns K J, Shamsadeen B N, et al. Accurate measurement of induction motor losses using balance calorimeter [J]. IEEE Proceedings B - Electrical Power Applications, 1991, 138 (5): 233-242.

[10] Mehmet Sanli alp, Christian Molin, Vladimir V Shvartsman, et al. Modified differential scanning calorimeter for direct electrocaloric measurements [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63 (10): 1690-1696.

[11] Baholo B, Mellor P H, Howe D, et al. An automated calorimetric method of loss measurement in electrical machines [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1994, 133 (1-3): 433-436.

[12] Jalilian A, Gosbell V J, Perera B S P, et al. Double chamber calorimeter (DCC): A new approach to measure induction motor harmonic losses [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14 (3): 680-685.

[13] Chillet C, Isnard R, Haidi A W, et al. Analysis and localization of losses in an induction machine using a calorimetric method [J]. Electric Machines & Power Systems, 1990, 18 (1): 29-39.

[14] Aarniovuori L, Cao W, Chen H, et al. New shunt calorimeter for testing electric motors [A]. 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting [C]. 2015. 1-8.

[15] 汪晶慧, 陈为 (Wang Jinghui, Chen Wei). 超低损耗角磁芯损耗测量的量热计法 (Study of calorimetric method to measure loss of super low loss angle core) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (4): 6-9.

Comparison calorimetry method to accurately measure core losses

WANG Jing-hui, CHEN Kai-bao, CHEN Wei

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Accurate core loss measurements of magnetic components operating at high frequencies are difficult. In this paper, a new method is presented to measure high frequency core loss which is called comparison calorimetry method. The principles, error composition and the measuring system are introduced. By using a comparison resistance which is controlled with pulse width modulation as a reference hot source, this method can effectively eliminate errors of traditional calorimetry, and improve measurement accuracy remarkably. The confirmatory experiment shows that the comparison calorimetry can be used to measure magnetic core loss of the magnetic elements with small loss angle.

Key words: core losses; calorimetry; comparison calorimetry