

Study on the AC Loss Measurement of High Temperature Superconducting Tapes and Coils

Mingshuo Wu¹, Yufan Yan¹, Nannan Hu²

¹Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing

²Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming Yunnan

Email: wms14@mails.tsinghua.edu.cn

Received: May 6th, 2017; accepted: May 23rd, 2017; published: May 26th, 2017

Abstract

In this paper, a new measuring system for the AC loss of High Temperature Superconducting (HTS) tapes and coils was designed, and tested. The system consists of AC current source, acquisition system, power protection system, compensation system, and the measurement is based on the high sensitivity data acquisition card. The power compensation technology and inductance compensation technology were applied in this system. The tests on the AC loss of types and coils prove the testing stability and accuracy of the new AC loss measuring system for HTS tapes and coils.

Keywords

HTS, AC Loss, Capture Card, Inductance Compensation

高温超导带材和线圈的交流损耗测试方法研究

吴明硕¹, 燕宇帆¹, 胡南南²

¹清华大学机械工程系, 北京

²云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明

Email: wms14@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017年5月6日; 录用日期: 2017年5月23日; 发布日期: 2017年5月26日

摘 要

文中介绍了以采集卡为测量手段, 由交流电流源、测量系统、电流源保护系统和补偿系统组成的高温超

导带材/磁体交流损耗测试系统。测试系统将功率补偿技术、电感补偿技术应用于采集卡交流损耗测试方法中。通过单匝带材交流损耗测试、线圈交流损耗测试等测试结果，验证了高温超导带材/磁体交流损耗测试系统测试的准确性和稳定性。

关键词

高温超导，交流损耗，采集卡，电感补偿

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高温超导材料是指在超过 77 K 温度下具备超导电性的材料，其制冷成本相比低温超导材料有大幅衰减。常见的高温超导材料有 Bi 系、Y 系两种，Bi 系材料需要将银制套管拉拔、轧制、热处理制成 Bi 系超导带材，Y 系超导材料通过涂层技术复合到柔性金属基带上制成 Y 系超导带材。Bi 系/Y 系高温超导带材在自场或外场作用下，磁感线从外侧开始穿透并逐渐移动，超导带材内部的钉扎会阻碍磁通流动出现电阻效应，交变外场也会在基底材料中产生涡流出现阻性损耗，这些电阻效应产生的热量即为超导带材的交流损耗。在 77 K 温度下，超导带材产生的交流损耗会为制冷系统带来至少 15 倍的能量损耗[1]，也可能造成带材局部失超，严重威胁超导磁体的安全运行。因此，高温超导带材和线圈交流损耗的研究，特别是交流损耗测试方法的研究，对制冷系统负载评估、带材和线圈磁体安全运行有重要意义。

交流损耗测量常用的方法有热测法、电测法和磁测法。电测法适用于中小型系统的交流损耗测量[2]，操作方便直观，灵敏度高，测量时间较短。1992 年，Orehotsky [3]等人研究平行场对 Bi-2223 线材交流损耗影响，实验电流频率为 15~180 Hz。1994 年，Masataka 和 Yang [4]利用锁相放大器装置和罗氏线圈测量得到了 Bi-2223 带材的自场损耗。实验测得的自场交流损耗在低频段是磁滞性的，与 Bean 模型的计算结果一致。锁相放大器测量短带交流损耗[5] [6] [7] [8]已成为一种较为成熟的电学测量方法。

本文将以采集卡为测量手段，研究新的测试原理下高温超导带材和线圈交流损耗的测试方法，并将功率补偿和电感补偿技术应用于采集卡交流损耗测试系统，试图提高了测试系统的通流性能和测量性能。

2. 高温超导带材/磁体交流损耗测试系统

高温超导带材/磁体交流损耗测试系统主要组成：信号发生器、功率放大器、变压器构成的交流电流源；采集卡、罗氏线圈、Labview 平台及数字滤波器组成的测量系统；隔直电容、光电隔离器、功放保护电阻组成的电流源保护系统；补偿线圈、补偿电容组成的补偿系统。下面将介绍高温超导带材/磁体交流损耗测试系统中各个分系统的主要原理和用途。

2.1. 测试系统组成及原理分析

高温超导带材/磁体交流损耗测试系统组成如图 1 所示，主要包括交流电流源、测量系统、电流源保护系统和补偿系统。测量系统包括采集卡、罗氏线圈、Labview 平台及数字滤波器，采集卡是测试系统的核心部件，直接采集带材的端电压和带材电流对应的感应电压；罗氏线圈是由螺线管环绕而成的环形线圈，它的感应电压与电路中通过的电流和频率成正比，相位与电流相差 $\pi/2$ ；数字滤波器能够有效滤

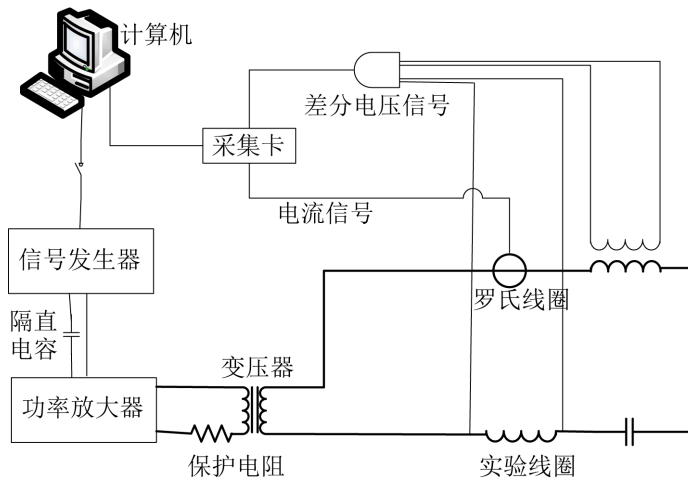


Figure 1. The schematic of the AC loss measuring system for high temperature superconducting (HTS) tapes and coils

图 1. 高温超导带材/磁体交流损耗测试系统原理图

除 20~100 Hz 有效信号中的 50 Hz 工频干扰; Labview 平台是整个系统的控制中心, 能够控制交流电流源的输出和测量系统的采集。

交流电流源是由信号发生器、功率放大器和变压器组成的可变频交流电流源, 其主要工作电流为 0~100 A, 所需工作频率为 20~100 Hz。信号发生器输出一个频率可调的低电压小电流信号进入功率放大器; 功率放大器能够对输入信号进行功率增益, 将信号增强为高电压小电流信号输入到变压器; 降压变压器能够通过降压增流, 将信号转变为低电压大电流信号。变压器输出的信号即为可以直接通入高温超导带材中的交流信号, 通过调节三类组件的输出参数可以调节交流信号的电流幅值和频率。

电流源保护系统由隔直电容、光电隔离器、功放保护电阻组成。隔直电容放置在信号发生器和功率放大器之间, 能够有效隔离信号发生器交流信号中的直流偏置, 防止音频功率放大器信号失真和损坏; 光电隔离器是计算机和信号发生器之间的电压隔离器, 计算机发出的数字信号中带有 50 Hz 的工频干扰, 会直接影响功率放大器的输出波形, 当变压器副边负载为短样带材时, 工频干扰会产生 10~15 A 的无效电流; 功放保护电阻是变压器原边的保护电阻, 当测试对象为短样带材时, 整体电路的等效阻抗太小, 需要通过串联无感电阻进行功率放大器的输出负载匹配。补偿系统由补偿电容和补偿线圈组成, 将在 2.2 和 2.3 中详细介绍。

在交流损耗测量中, 有功功率即为高温超导带材的交流损耗, 无功功率主要来自带材电感引起的磁场储能与释放, 带材的无功功率远大于有功功率。传统的锁相测量法能够测得与电流同相的压降分量, 利用 $P = IV \cos \theta$ 公式求出交流损耗。采集卡测量能够采集整个时间域内任意采集时刻的瞬时电压和电流值, 即能够采集完整的带材电流、电压波形。利用电流、电压波形可以拟合出电流、电压信号的函数, 求出电流、电压幅值和两个同频信号的相位差, 并用 $P = IV \cos \theta$ 求得交流损耗。此种采集卡测量方式在波形拟合过程中会出现较大误差, 且计算效率非常低。通过对数据处理方式的改进, 利用采集卡采集连续时间内的瞬时电流、电压, 在整个时间域内对电流、电压的乘积进行积分。由于输入信号为正弦信号, 线圈内的电感信号也表现出良好的正弦特性, 正弦信号的分量积分后数值为零, 整个积分结果中仅剩交流损耗分量, 积分结果即为此段时间内的平均交流损耗功率。

设定电路中电流、电压信号为正弦信号, 相位差为 φ , 且 $i(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$, $u(t) = U_0 \cos(\omega t + \varphi_1)$, $\varphi = \varphi_1 - \varphi_0$

$$u(t) \cdot i(t) = \frac{1}{2} U_0 I_0 [\cos \varphi_0 \cos \varphi_1 + \sin \varphi_0 \sin \varphi_1 + \cos 2\omega t \cos \varphi_0 \cos \varphi_1 - \sin 2\omega t (\sin \varphi_0 \cos \varphi_1 + \cos \varphi_0 \sin \varphi_1) - \cos 2\omega t \sin \varphi_0 \sin \varphi_1] \quad (1)$$

由于 $\sin 2\omega t$ 、 $\cos 2\omega t$ 在整周期内积分为 0，对 $u(t) \cdot i(t)$ 积分可得，

$$\frac{1}{n} \int_0^{nT} u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos(\varphi_1 - \varphi_0) = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi \quad (2)$$

由式(2)可知，在损耗测量中单位时间内电流、电压乘积的积分等同于电流和与电流同相的压降分量有效值的乘积，即为所需测量的带材交流损耗。对于存在畸变的电流或电压信号，均可以通过傅里叶分解为多个单一正交的正弦信号的叠加，相同的处理方式仍可以测得带材的交流损耗。

2.2. 功率补偿

功率补偿针对的是高温超导带材/磁体交流损耗测试系统中的补偿电容，补偿电容在变压器的副边，与测试带材串联。带材本身是具备储能功率的电感器件，串联补偿电容后，会降低变压器副边的总体等效阻抗。如果在指定频率上选择合适的补偿电容值，使得电路达到谐振状态，理论上带材与电容的整体阻抗仅为带材本身的阻性值。设定谐振电路中带材电感 L ，等效电阻 R ，补偿电容 C ，副边整体电压 $u(t) = U_m \sin \omega_0 t$ ，则电路电流和电容端电压分别为

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \sin \omega_0 t = I_m \sin \omega_0 t \quad (3)$$

$$u_C(t) = \int \frac{i(t)}{C} dt = \frac{I_m}{\omega_0 C} \sin(\omega_0 t - 90^\circ) = -\sqrt{\frac{L}{C}} I_m \cos \omega_0 t \quad (4)$$

电路中补偿电容、带材和整体电路功率分别为

$$P_C(t) = \frac{1}{2} C u_C^2(t) = \frac{1}{2} L I_m^2 \cos^2(\omega_0 t) \quad (5)$$

$$P_L(t) = \frac{1}{2} L i^2(t) = \frac{1}{2} L I_m^2 \sin^2(\omega_0 t) \quad (6)$$

$$P_{\text{all}}(t) = P_C(t) + P_L(t) = \frac{1}{2} L I_m^2 \quad (7)$$

在理想谐振电路中，电路整体电压为 0，带材储存的磁场能量和电容储存的电场能量进行周期性震荡交换，不与电源进行能量交换，电路中总能量稳定。当电路中电流发生改变时，才会从电源处吸收能量，重新达到更高的平衡态。利用补偿电容进行功率补偿，能够有效降低变压器副边的电压，提高交流损耗测量电路中的电流。

2.3. 电感补偿

补偿系统除用于功率补偿的补偿电容外，还包括用于电感补偿的补偿线圈。传统的电容补偿方式具有频率敏感性，易产生高次谐波[9]，电路中的接触电阻易干扰交流损耗测量。利用互感方式制作补偿线圈机构对带材或线圈进行电感补偿，如图 2 所示。在测试过程中中心转轴的旋转自由度固定，绕有细铜丝的补偿线圈，依靠定位螺母在中心转轴上相对固定。激励线圈上绕有粗铜线，依靠线圈托盘内螺纹在中心转轴上旋转。在实验过程中，线圈托盘在转轴上的旋转能够调节互感机构的电感值。

激励线圈串联在测试电路中，与测试带材或线圈具有相同相位的电流，补偿线圈是互感机构的次级线圈，能够感应同轴激励线圈产生的磁场，产生与测试带材或磁体线圈反向的电压信号。将测试带材或

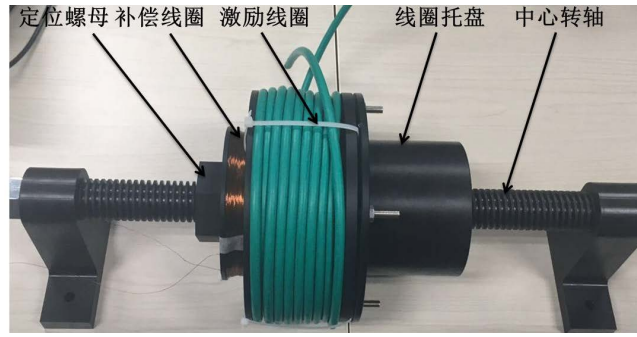


Figure 2. The mutual-inductance compensating equipment
图 2. 互感补偿线圈机构

磁体线圈电压信号和补偿线圈电压信号做串联处理后, 即可得到补偿后带材或磁体线圈的电压信号。设定带材或磁体线圈等效电阻 R , 电路中电流 $i(t)$, 则采集卡测量电压 $u_L(t)$ 和互感值 M 可表示为

$$u_L(t) = i(t) \times R + L \frac{di(t)}{dt} - M \frac{di(t)}{dt} = i(t) \times R + (L - M) \frac{di(t)}{dt} \quad (8)$$

$$M = \mu_0 N_1 N_2 \frac{\pi r_2^2}{2 r_1} \quad [9] \quad (9)$$

由式(8)可知, 当 $L = M$ 时, 采集卡采集的补偿电压信号全部是阻性信号, 也就是带材或磁体线圈等效电阻产生的电压。互感线圈电感 M 可以根据式(9)计算得到, 其中 μ_0 为真空磁导率, N_1, N_2, r_1, r_2 为激励线圈、补偿线圈匝数和平均绕制半径。在实际使用过程中, 补偿线圈会引入外界环境 50 Hz 电磁干扰, 对补偿线圈匝数 N_2 和补偿量的控制, 会影响高温超导带材/磁体交流损耗测试系统测量的准确性。

3. 系统测试结果分析

针对高温超导带材/磁体交流损耗测试系统, 进行了单匝带材交流损耗测试、线圈交流损耗测试和电感补偿对比测试。单匝带材测试利用测试系统测量了单匝带材的交流损耗, 并与 Norris 方程计算结果进行对比; 线圈交流损耗测试以线圈为测试对象, 测量了多个频率的交流损耗; 电感补偿对比测试中, 对电感补偿前后的线圈交流损耗进行测试, 下面将进行测试结果分析。

3.1. 单匝带材交流损耗测试

Norris [10]在 1970 年给出了单位长度上单个周期内椭圆截面和矩形截面的超导带材交流损耗的公式, 单匝测试中所用的带材为住友 BSCCO 椭圆截面带材, 可以利用式 10、11 进行损耗估算和实验检验, 具体表达式为:

$$Q = \frac{\mu_0 I_c}{\pi} \left\{ (1 - F) \ln(1 - F) + \frac{(2 - F)F}{2} \right\} \quad (10)$$

$$F = \frac{I_m}{I_c} \quad (11)$$

其中 Q 为带材交流损耗, μ_0 为真空磁导率, I_c 为带材临界电流, I_m 为带材实际通流, F 为约化电流。在单匝带材交流损耗测试中, 使用图 3 的工装绕制了 0.3 m 住友 BSCCO 带材, 利用高温超导带材/磁体交流损耗测试系统在 77 K 下进行测试, 测试结果如图 4 中黑色曲线所示, 系统所通电流(40 Hz)峰值最高达到 98 A, 在双对数坐标下, 单位交流损耗随电流变化曲线的线性较好。通过与式(10)、(11)的 Norris 方

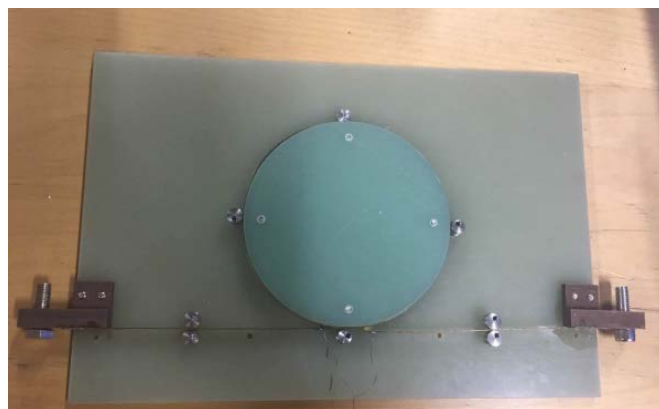


Figure 3. The measurement tooling for the single tape
图 3. 单匝带材测试工装

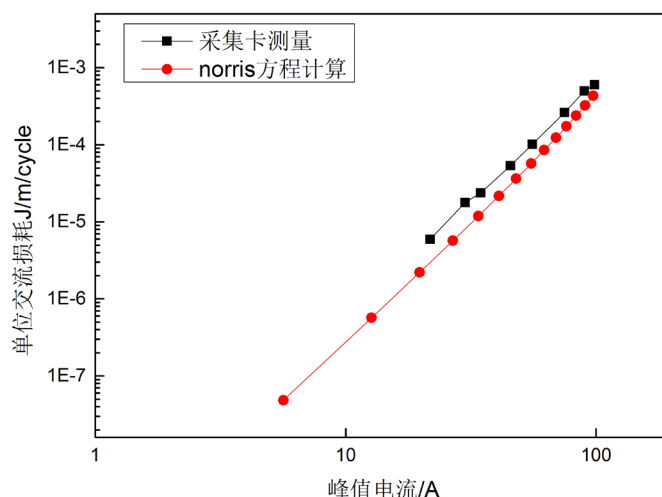


Figure 4. The AC loss test on the single tape
图 4. 单匝带材交流损耗测试

程计算结果(红色曲线)对比分析,可以看出单匝带材交流损耗的曲线的线性度和理论曲线吻合较好,数值相比 Norris 方程偏高的原因一方面来自单匝绕制引起的外磁场损耗,一方面也来自于铋系高温超导带材中银包套材料的涡流损耗,还有可能是存在一些测量系统误差。这些都需要我们在今后实验工作中加以矫正。

3.2. 线圈交流损耗测试

在线圈交流损耗测试中,选择住友 BSCCO 带材绕制的 72 匝双饼跑道型线圈作为测试对象,在 14、19、23 Hz 下进行交流损耗测试。测试结果如图 5 所示,19、23 Hz 下线圈单位交流损耗重合性非常好,没有频率依赖性,与 Norris 理论相符。但在 14 Hz 下,线圈单位交流损耗有所偏差,主要原因是低频情况下总体交流损耗功率较小,测量误差偏大。

为进一步验证高温超导带材/磁体交流损耗测试系统的准确性,使用相同的测试线圈,在 23 Hz 下进行了 4 组重复性测试,测试结果如图 6 所示。图中 4 条曲线重合性非常高,进一步证明高温超导带材交流损耗测试系统的准确性和测试结果的有效性。在 77 K 温度下,72 匝双饼跑道型线圈通流 30 A/23 Hz 时交流损耗功率为 3.68 W。

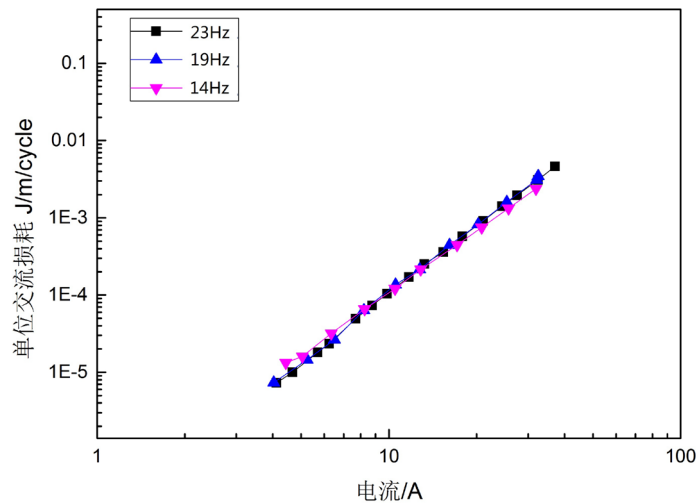


Figure 5. The multi-frequency AC loss tests on the coil
图 5. 线圈多频率交流损耗测试

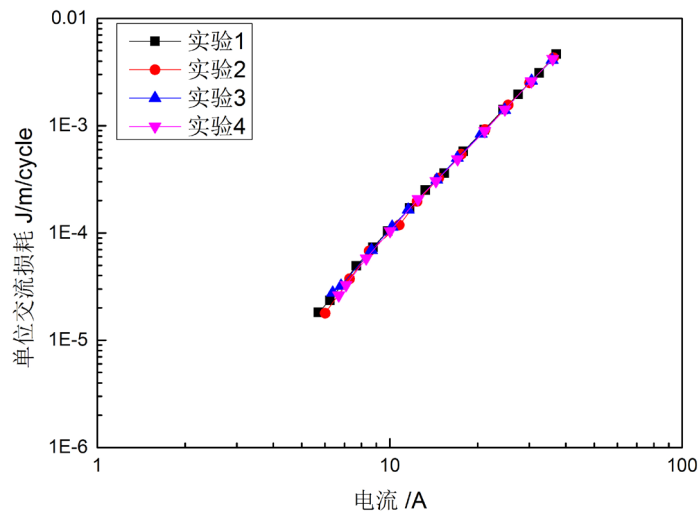


Figure 6. The repeatability test for the AC loss of the coil
图 6. 线圈交流损耗重复性测试

3.3. 电感补偿对比测试

以 5.5 mH 的高温超导双饼圆线圈作为测试对象，首先用高温超导带材/磁体交流损耗测试系统测量了未补偿情况下的单位交流损耗，如图 7 的黑色曲线所示。可以看出低电流情况，损耗曲线波动较大，电流大于 10 A 后测量曲线趋向于线性增长。利用高温超导带材/磁体交流损耗测试系统的补偿线圈(互感值 2.9 mH)进行电感补偿，测试结果如红色曲线所示。红色曲线代表的交流损耗测试结果在整个测试中更为稳定，线性相关性更为明显，说明补偿机构能够有效提高高温超导带材/磁体交流损耗测试系统的测试精度和稳定性。

4. 结论

本文以采集卡为测量手段，研究了具有交流电流源、测量系统、电流源保护系统和补偿系统的高温超导带材/磁体交流损耗测试系统。通过功率补偿提高了系统的通流能力；通过添加补偿线圈和电感补偿

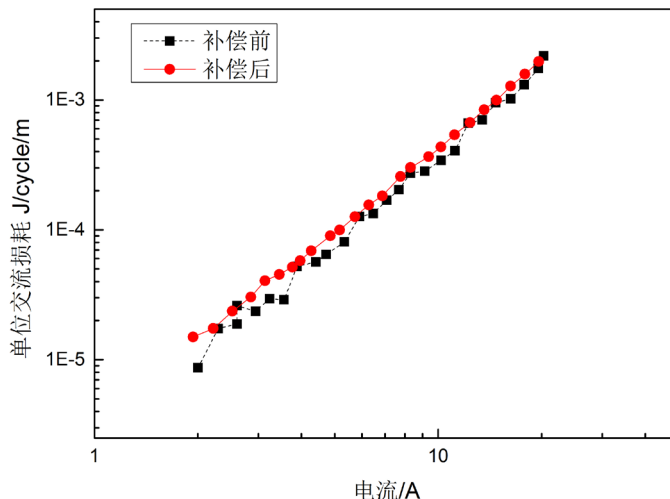


Figure 7. The AC loss tests before and after the compensation

图 7. 补偿前后交流损耗测试

对比测试，证明了电感补偿技术对交流损耗测试系统稳定性和准确性的提升；通过单匝带材交流损耗测试和线圈交流损耗测试，以及与 Norris 理论的对比，进一步证明了高温超导带材/磁体交流损耗测试系统在带材和线圈交流损耗测量中的准确性。

参考文献 (References)

- [1] Oomen, M.P. (2000) AC Loss in Superconducting Tapes and Cables. University of Twente, Enschede.
- [2] 堵益高. YBCO 高温超导体的交流损耗仿真计算研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [3] Orehtsky, J., Reilly, K.M., Suenaga, M., *et al.* (1992) AC Losses in Powder-in-Tube $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ Tapes at Power Frequencies. *Applied Physics Letters*, **60**, 252-254.
- [4] Yang, Y., Hughes, T., Yi, Z., *et al.* (1994) Studies of Self-Field AC Losses in PbBi-2223 Ag-Sheathed Tapes. *Cryogenics*, **34**, 789-792.
- [5] 蔡龙晟. 多根铁磁基带高温超导带材的交流损耗分析与测量研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [6] 刘二伟, 方进, 霍英杰. YBCO 带材交流损耗电测法实验研究[J]. *低温与超导*, 2015, 43(11): 35-38.
- [7] 李小汾. 多芯 Bi-2223/Ag 带材交流损耗的特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2008.
- [8] 赖凌峰. 高温超导线圈稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2015.
- [9] Ainslie, M.D., Yuan, W., Hong, Z., *et al.* (2011) Modeling and Electrical Measurement of Transport AC Loss in HTS-Based Superconducting Coils for Electric Machines. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **21**, 3265-3268.
- [10] Norris, W.T. (1970) Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors Carrying Ac: Isolated Conductors and Edges of Thin Sheets. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **3**, 489.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ms@hanspub.org