

ICS
CCS

团 体 标 准

T/CIE 653-2025

材料磁性的振动样品磁强计测量法

Vibration sample magnetometer measurement method for magnetic
properties of materials

(征求意见稿)

2025-XX-XX 发布

2025-XX-XX 实施

中国电子学会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 基本术语	1
3.2 磁矩 (Magnetic Moment)	1
3.3 振动样品磁强计 (Vibrating Sample Magnetometer)	1
3.4 鞍区 (Saddle Region)	1
4 测量原理	2
5 振动样品磁强计	2
5.1 总体构造	2
5.2 探测线圈组	3
5.3 振动系统	3
5.4 励磁装置	3
5.5 磁场测量装置	3
5.6 锁相放大装置	4
5.7 其他辅助器件	4
6 磁矩的测量	4
7 样品和自退磁校正	4
8 磁场强度的测量	4
9 磁滞回线或退磁曲线的测量	4
9.1 基本测量步骤	4
9.2 测量环境	5
9.3 典型样品的测量	5
10 测量重复性和再现性	5
11 测试报告	5
附录 A (资料性) 感应式直流磁强计分类	6
A.1 概述	6
A.2 线性探测式	6
A.3 非线性探测式	6
附录 B (资料性) 关于变温测量的说明	7
B.1 概述	7
B.2 低温恒温器部件	7
B.3 高温恒温器部件	7
B.4 中温恒温器部件	7

附录 C (资料性) 典型磁性材料测量比对	8
C. 1 硬磁块材	8
C. 2 弱磁矩薄膜材料	8
C. 3 软磁粉末或磁流体	9
附录 D (规范性) 磁矩量的定标	11
D. 1 概述	11
D. 2 比较法	11
D. 3 斜率法	11
D. 4 磁矩线圈法	11
附录 E (规范性) 镜像校正	13
E. 1 概述	13
E. 2 校正方法	13
参考文献	14

前　　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电子学会提出并归口。

本文件起草单位：北京物科光电技术有限公司、中国科学院物理研究所、北京东方晨景科技有限公司、中国计量科学研究院、长春市英普磁电技术开发有限公司、中国计量大学、致真精密仪器（青岛）有限公司、多场低温科技（北京）有限公司。

本文件主要起草人：陆俊、张晓萌、刘小军、张志高、许志一、张天涵、吴琼、张学莹、丛君状

材料磁性的振动样品磁强计测量方法

1 范围

本文件规定了使用振动样品磁强计测量材料静态磁性的基本方法,振动样品磁强计的励磁方式为电磁铁。

本文件适用于永磁材料、软磁材料、弱磁材料磁性能的测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则
- JJF 1001-2011 通用计量术语及定义
- GB/T 9637-2001 电工术语 磁性材料与元件
- GB/T 13888-2009 在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法
- GB/Z 26082-2010 纳米材料直流磁化率(磁矩)测量方法
- JJF(浙)1177-2021 磁矩参考样品校准规范

3 术语和定义

3.1 基本术语

本节未专门说明的基本术语, JJF 1071-2010、JJF 1001-2011、GB/T 9637-2001、GB/T 13888-2009与GB/Z 26082-2010中界定的术语和定义,适用于本文件。

3.2 磁矩 (Magnetic Moment)

磁矩是磁铁或载流体样品中所有等效闭合电流与回路面积相乘并矢量求和的结果,用于度量其产生磁场的能力。国际单位制(SI)单位为安培·平方米: $A \cdot m^2$ 。在电磁学应用领域, CGS单位制仍然被保留使用,磁矩对应单位是emu(“电磁单位”的英文缩写), $1A \cdot m^2 = 1000 \text{ emu}$ 。工作磁矩通常取被测样品磁矩在磁场加载方向的分量。

3.3 振动样品磁强计 (Vibrating Sample Magnetometer)

振动样品磁强计(VSM)是实验室常用的通过给样品加载磁场同时记录磁矩响应从而测量样品磁性的仪器。它已发展成一种基于电磁感应原理的高精度磁矩测量仪器,其核心原理是通过检测振动样品产生磁场被若干对感应线圈探测的电动势来计算其磁矩。

当试样的体积或质量被测定之后,可计算出试样单位体积或单位质量的磁矩,它们分别称为磁化强度 M ,是重要的磁学基本量。改变磁场测量 M 可得到磁化曲线和磁滞回线,由此可以确定各种磁化率,饱和磁化强度,剩磁,矫顽力等;由改变温度测得的数据,可以得到上述量的温度系数,居里温度,补偿温度和有关的磁性分析信息。如果测量它们随时间的变化,还可做磁后效和时间稳定性研究等等。因而VSM可以测得大部分的磁性参数。是磁学和磁性材料研究不可缺少的测量工具。

3.4 鞍区 (Saddle Region)

在VSM中,由于探测线圈为偶数对称布置,样品在探测空间内从中心往外,横向与纵向移动时的信号响应分别呈现极大与极小值,数学上在正交方向同时具备极大与极小值的函数对应马鞍面,其中马鞍面的平坦区域被称为鞍区,VSM的灵敏度响应符合该特点,因而也通过鞍区表示样品在探测空间内均匀测量的范围。

4 测量原理

在磁场中被磁化了的一小块样品，可视为一磁偶极子。通过连接杆和振动头可把垂直方向的正弦振动传递给样品。当样品受迫振动时，在它附近的探测线圈中会感应出一电压信号，其大小正比于样品的磁矩、振幅和振动频率。样品放在电磁铁的两极之间，改变磁场可使样品被磁化到不同的状态，或者改变温度使样品处在不同温度，便可测量出样品磁性随磁场或者温度的变化。

VSM利用了这种产生与样品的磁特性有关的电压信号的方法，来测量材料的磁特性。采用镍球等标准样品对磁矩进行比较法或斜率法进行定标，从而将电压值转变成被测样品的磁矩值。镍球磁矩的复核或重赋值则可通过电流磁矩线圈标准进行标定，三种定标方法如附录D介绍。标定与测量的样品尺寸形状尽量保持一致，并均处在鞍区内。

假设样品被均匀磁化，通常磁性材料的磁滞回线如图1所示，原始测量的磁矩，通过体积换算为磁化强度，然后由公式1进行退磁校正，将磁化强度随外加磁场依赖转换为随有效内场依赖，从而获得材料的剩余磁化强度 M_r 与内秉矫顽场 H_c 。

$$H_{eff} = H_{ext} - N_m M \quad (1)$$

其中 N_m 为磁强计退磁因子（不要与磁通计退磁因子 N_f 相混淆^[1-2]）。当需要获得材料磁感应强度相关性能，则根据公式2进行换算获得BH回线，BH回线与退磁校正前后MH曲线的关系，如图1所示。

$$B = \mu_0(M + H) \quad (2)$$

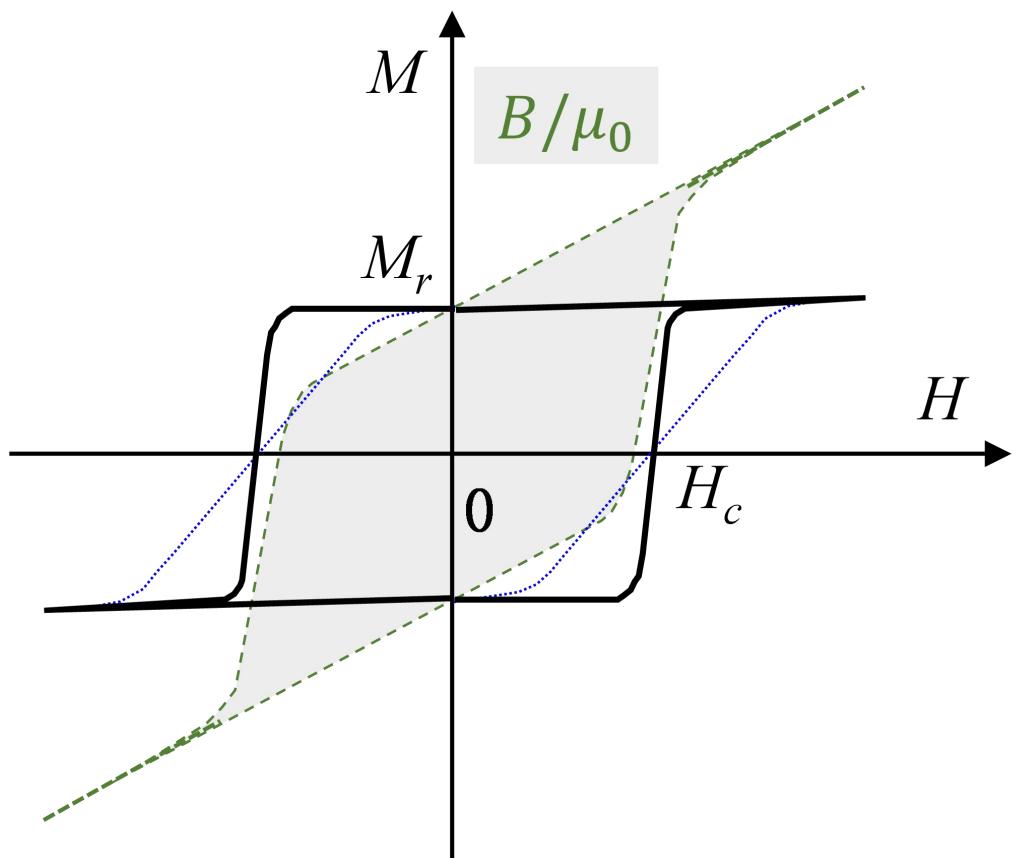


图1 磁滞回线图示，其中细虚线表示未做退磁校正的MH曲线，粗黑实线是退磁校正后的MH曲线，带浅灰背底的短线区表示BH曲线（除以 μ_0 使得其与MH同框比拟）

5 振动样品磁强计

5.1 总体构造

如图2所示，振动样品磁强计包括电磁铁、振动头、探测线圈组、微弱信号检测的锁相放大器、以及测量软件。样品连接到非磁性、非导电棒的端部，并置于由电磁铁产生的均匀横向磁场中。样品和杆在垂直于场的方向上振动。通过将样品棒的端部连接到扬声器弹片上，并用适当频率的交流电驱动扬声器线圈来驱动。振荡的频率和幅度必须通过设备的机械设计或适当的反馈系统保持恒定。工作频率通常选择在10至200 Hz的范围内，振幅通常选择为0.1~1 mm。工作频率避开实验室工频的整数倍，以避免拾取工频谐波信号干扰。

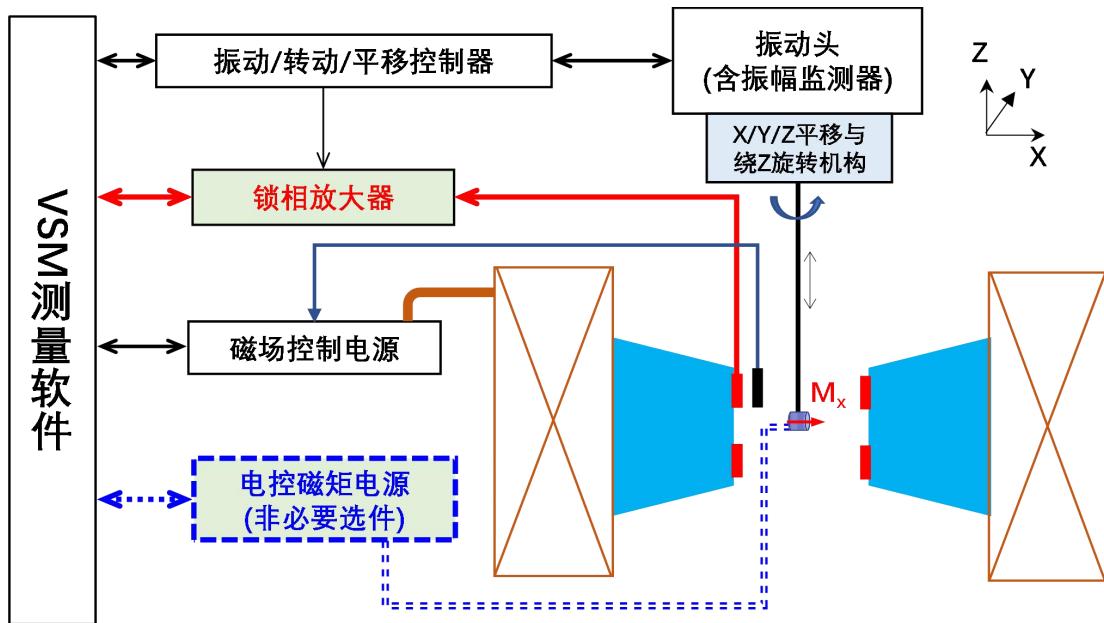


图 2 振动样品磁强计构造示意图

5. 2 探测线圈组

探测线圈组由偶数个线圈相对于样品对称放置，每个线圈由上千圈匝数的漆包线绕制而成，线圈朝向或引线配对以使得样品水平横向磁矩分量的振动偶极场在线圈中的感应电压产生同相位叠加。线圈中产生的交流电压通过直接或差分的方式接到锁相放大器，经过微弱交流信号的去噪声放大和测量，与样品的偶极矩分量成比例变化。

5. 3 振动系统

由于振动样品磁强计的输出感应电压跟振动杆的振幅与频率的稳定密切相关，为了提高测量结果的精确性，通常使用光电或电磁式振动传感器监测并反馈给测量系统。光电式振动传感器由振动上端放置一反射块，并通过激光干涉效应监测振动杆的振动频率与幅度；电磁式振动传感器通过第二组线圈和包括附接到样品棒的小永磁标准样品构成，其跟振动杆同步振动时输出监测信号。

5. 4 励磁装置

本文件描述的振动样品磁强计由电磁铁作为励磁机构。电磁铁给仪器提供磁场环境。由于磁场直接影响样品的磁矩，其稳定性非常重要，除了需要使用低噪声直流电源之外，还需要双极性电流平滑匀速过零，且使用霍尔探头的电压作为反馈量对磁场进行稳定的闭环控制，以防止驱动电流的温漂和波动影响。

5. 5 磁场测量装置

需要精确的磁场监测与反馈，通常电磁铁电源内部集成特斯拉计（高斯计），而且具备直接放大和校正霍尔探头电压的能力，使驱动电压与磁场关系重复一致。为了提高霍尔探头的准确性，其内部宜集

成经过精确标定的温度计，用来补偿温度波动对霍尔探头的影响。霍尔探头选用低温度系数的传感器，且每个传感器的温漂系数也都精确标定，这实现了磁场控制的高度稳定。电磁铁需要保证磁场随时间变化的稳定性在0.5%；若在样品提及范围内的磁场均匀度保持在3%，则不需要采取措施来抵消外场不均匀性影响；允许径向场高出纵向场1%。

5.6 锁相放大装置

锁相放大器是用于微弱信号检测的装置，微弱信号常淹没在各种噪声中，锁相放大器可以将微弱信号从噪声中提取出来并对其进行准确测量。其技术核心为相敏检测技术。振动样品磁强计中所采用的数字锁相放大器应支持内部参考模式、交直流耦合、差分输入模式、0.1~100 s积分时间、覆盖10 Hz~100 kHz频点、以及100 nV以下自动量程设置测量进行微弱磁矩信号探测。

在内部参考模式下，锁相放大器通过正弦信号输出给振动头提供稳定驱动信号，另一方面对探测线圈输入的差分信号进行解调。锁相放大器的工作频率、驱动幅度均受上位机软件控制，并将探测线圈信号解调结果反馈给系统软件，供输出磁矩或磁化强度测试结果。

5.7 其他辅助器件

根据需要，振动样品磁强计支持恒温腔，便于开展低温或高温条件下进行测量，由于这部分内容并非本测试方法主体内容，在附录A进行资料性介绍。

6 磁矩的测量

从锁相放大器解调的电压信号经过标定后作为被测样品磁矩信号进行记录，标定方法采用附录D中的一种。当被测量磁场超过5 kOe时，参考附录E进行镜像校正，以准确获得被测样品的磁矩信息。磁矩测量结果除以样品的体积或质量并根据7.3节的退磁处理后，可以获得样品的磁化强度信息。

7 样品和自退磁校正

7.1 样品形状与自退磁校正有关，优先选择形状简单的样品。样品尺寸不应超出仪器鞍区。

7.2 球体为自退磁校正最准确的形状，球体的尺寸将取决于所使用的探测线圈组，对于普通仪器，其直径不超过5毫米。

7.3 如果非球形样本可以通过计算退磁因子对测量结果进行校正，并且磁场平行于对称轴施加，则可以使用非球形样本。对于规则的圆柱或长方体样品，依据参考文献1-2计算退磁因子。

7.4 对于薄膜样品或长条状样品通过理想二维或一维近似估计退磁因子；对于薄片状样品（如各种音像磁带，非晶带，薄膜等），根据测量要求的磁场方向通常分为垂直或平行于膜面两种，其膜面内或带面内的退磁因子可近似为零，而垂直于膜面的退磁因子近似为1。

8 磁场强度的测量

由数字磁强计测量。使用前先“校准”、“调零”，测量时将霍尔探头放在样品附近，旋转霍尔探头，使磁场读数最大。

9 磁滞回线或退磁曲线的测量

9.1 基本测量步骤

9.1.1 安装样品，确保样品洁净前提下，先用精度不低于0.1 mg的电子天平测出样品质量；随后将样品根据测量要求方向固定在样品连接杆上，固定方法通常为机械压紧；然后手持样品杆的连接件，对准振动头的安装插口拧紧。

9.1.2 预设定中心磁场，确保样品处在较高磁矩的被磁化状态。

9.1.3 定中心，先用机械或软件操控的方式让样品插入靠近探测线圈中心位置，注意样品杆不要被任何物体阻挡。打开软件上磁矩随时间变化的监控曲线图界面，通过执行软件上的定中心，或手动操作样品在Z方向的位置，寻找并定位于磁矩幅度响应的峰值，随后精细调整X和Y位移台，在这两个方向分

别寻找磁矩幅度响应的最低与最高点，可以反复再进行几轮 Z 方向以及随之的 XY 方向定中心，使得样品处于探测线圈的中心鞍点位置。

9.1.4 设定测量程序，即改变磁场速率及次序，确认次序以及设备状态，尤其是 5 kOe 以上磁场需要确保电磁铁的循环水正常运行，即可启动测量软件，开始自动测量。

9.1.5 测量前设备至少稳定工作半小时，并使其在环境温度中稳定下来，若必要可用空样品杆和调好的设备进行读零检查。将定标的样品放入测量，保证在测量环境温度下样品测量结果正确。

9.2 测量环境

测量应在常温常压且湿度适中环境下开展，即温度为 298 ± 3 K、湿度为 20%~80% 之间。

9.3 典型样品的测量

根据样品的形态来制备样品，块材可直接加工成规则形状测试、流体需要放置在样品杯中并进行适当固定、微弱磁矩样品则需要对样品托或沉底材料进行背底扣除，典型样品制备与测试见附录C。

10 测量重复性和再现性

对于尺寸合理的样品（直径为几毫米），并小心地将样品定位于探测线圈组内，可以开展 $\pm 1\%$ 范围内磁矩的重复测量。此外，考虑到样品体积或质量的不确定度，可以达到 $\pm 2\%$ 的精度和 $\pm 3\%$ 的准确度。

11 测试报告

- a) 样品名称，形状；
- b) 检测使用的技术标准和仪器；
- c) 测试时间，及对应的磁场加载速率；
- d) 检定的参数及结果：磁矩，居里温度，磁滞回线，环境温度。

附录 A
(资料性)
感应式直流磁强计分类

A. 1 概述

感应式直流磁强计大体分为磁通感应式与振动感应式, 其探测灵敏度系数分别跟探测线圈的磁场强度分量与磁场强度的一阶梯度分量对易。

就测量实现的线圈来说, 虽然通常磁通感应式与振动感应式都由同轴相对的线圈组合而成, 但探测电流方向却存在明显差异, 前已提到二者分别对应磁场与磁场随空间的一阶梯度, 所以对于磁通测量, 跟样品同心且同轴对称线圈之间的绕向应相同, 而振动感应式则相反。

就具体的测量原理来说, 磁通感应式又分为感应状态磁通差与感应磁通变化全过程检测两种, 通常二者分别被称之为抽拉法(withdrawal method)与提拉法(extracting method), 在提拉过程蕴含精细的信息量, 因而可以获得两个数量级以上的精度改善, 但测量便捷程度显然不如抽拉法, 所以分别在强磁矩与弱磁矩测量中被应用。振动感应式由于线圈结构的不同又分为线性探测与非线性探测两种, 分别作为振动样品磁强计的资料性介绍如下。

A. 2 线性探测式

常见的有一对反接的亥姆赫兹线圈, 与两对同轴顺接但上下错开相互反接的四线圈饼组合两种, 前者在轴向振动同时探测轴向磁矩分量, 而后者则在线圈饼的堆叠方向上振动同时探测线圈轴向磁矩分量。它们在样品范围内有比较大的灵敏度均匀区, 即在一定范围内振动时, 感应电压频率跟振动频率一致, 且与被测磁矩成正比。特点是均匀区范围较大, 但线圈间距限制灵敏度。

A. 3 非线性探测式

比如主探测线圈由一对间距小于半径的同轴反接线圈构成, 为了提高灵敏度同时降低外界干扰, 还可以在同轴外侧增加一对反向不同匝数的另一对反接线圈, 构成二阶梯度探测线圈。由于主探测线圈的间距相对半径较小, 灵敏度较高, 但同时牺牲了均匀性, 反映在感应电流上就存在明显的由振动带来的谐波信号, 其中倍频信号为主, 所以使用锁相放大器等进行探测时以二倍频信号作为磁矩的线性表征进行测量。由此可见, 非线性探测式特点是灵敏度高, 但均匀性及跨尺寸标定时的准确性很受影响。

附录 B
(资料性)
关于变温测量的说明

B. 1 概述

从物理含意来讲, 变温测量能够获得最关键的磁性参数是居里温度。居里温度是某一温度, 在低于此温度时材料呈铁磁性或亚铁磁性, 高于此温度时材料呈顺磁性。测量居里温度的方法很多。例如: 比热, 热胀系数, 磁导率(霍普金斯效应), 穆斯堡尔谱等。由磁学量精确测定这一温度, 需要测得磁化强度 M , 磁场 H 和温度 T 详细的三维数据。或用自发磁化强度的平方随 T 下降外推确定, 或用Arrott plot的方法确定。更深入的研究认为, 在居里温度附近, 许多物理量都出现反常的变化, 被称做临界现象。这些反常变化可用几个临界指数来描述。通过上述三维数据和比热数据可确定这些指数, 同时可精确测定居里温度 T_C 。 T_C 无论对基础研究还是材料研制都是非常重要的, 测量频度很高。为了快速、经济、有效, 通常由热磁曲线 $M(T)$, 在 M 急剧下降处, 外推到 $M=0$ 时的温度来确定居里温度。

在实验仪器中通常有高温、低温与中温配件, 相关部件通常需要增加真空和密封部件, 避免测量过程中低温结冰或高温烘烤损坏相邻部件。为了保证样品磁场的均匀性以及不明显偏离最高场指标, 高低温配件均应使用近零磁性材料制作。变温测量还配套有专门的安装平台, 以简化插入过程, 并可使样品每次都进入磁矩测量的中心区, 同时减少噪声干扰。

B. 2 低温恒温器部件

低温恒温器通常用液氦或液氮快速冷却样品, 使用液氦的变温范围可达5.5 K~450 K, 使用液氮的变温范围可达85 K~450 K。

B. 3 高温恒温器部件

高温炉内部有加热丝和绝热材料组成, 样品区温度从室温到 1000 °C变化。高温炉需要一个有效的绝热层, 绝热层由一个真空的外腔和多层反射型防热罩组成。样品区应采用低功率加热, 一是实现最小的磁干扰, 二是提高样品区的温度均匀性。在室温及以上温度下, 可以在氩气环境中对样品进行测量, 以保护样品不被氧化。

B. 4 中温恒温器部件

VSM专用高低温一体恒温器可以实现100~950 K范围内的温度变化, 期间要使用氮气、氩气和压缩空气作为传热介质。

附录 C
(资料性)
典型磁性材料测量比对

C. 1 硬磁块材

钕铁硼样品的振动样品磁强计测试。温度: 20 ± 3 °C; MH扫场范围: ± 32 kOe(2.5 MA/m); 振动频率: 56.7 Hz; 振动幅度: 1 cm。结果曲线如图C.1所示, 在使用带极头的电磁铁提供磁场源时, 应进行镜像校正, 才能跟超导磁体作为磁场源时的测量结果一致。

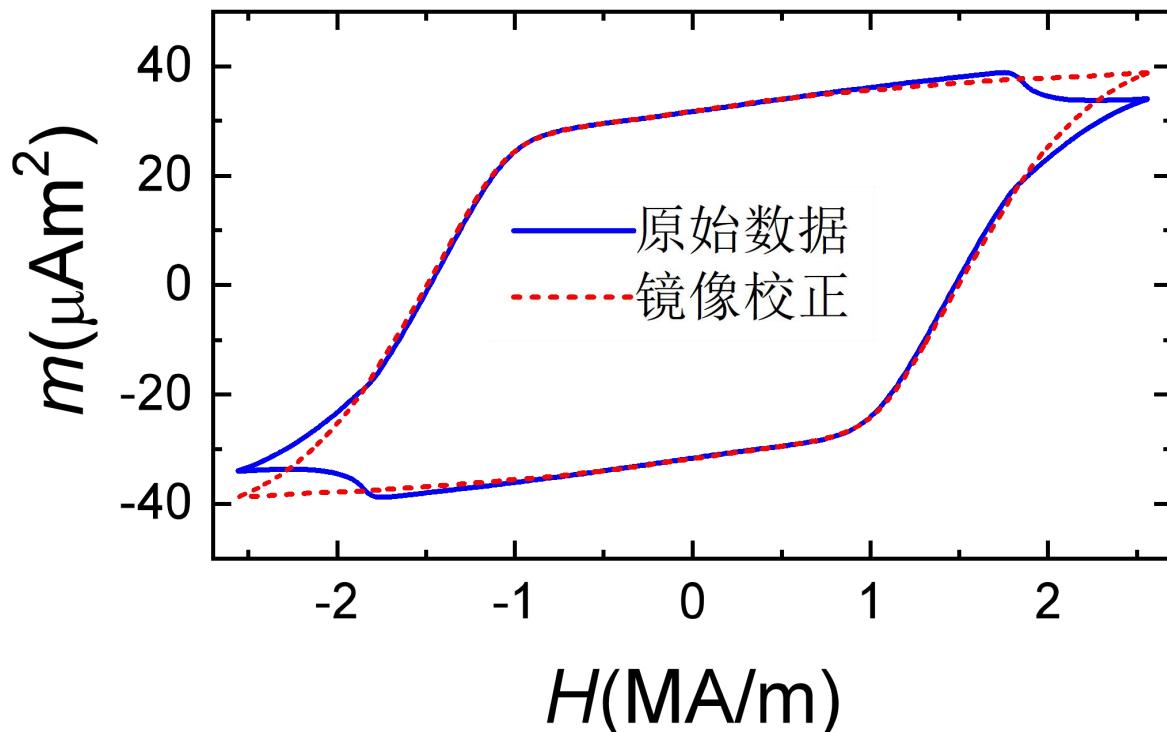


图 C. 1 某钕铁硼薄膜样品最高场测试, 其中蓝线是原始测量结果, 红线经过镜像校正

C. 2 弱磁矩薄膜材料

10纳米厚 Co_3Pd_7 薄膜样品; 温度: 20 ± 3 °C; 设定磁场: ± 1 kOe(79.6 kA/m); 间隙条件: Gap1 (7.5 mm); 振动频率: 56.7 Hz; 振动幅度: 1 cm。进行1 s时间间隔测量5 min, 结果曲线如图C.2所示。由于样品磁矩在 μ emu量级, 跟样品杆的背景磁矩值接近, 应对原始数据进行背景扣除。薄膜面积一般不超过 1 mm^2 , 如为了增强信号, 扩大面积, 建议使用等面积与厚度的镍片或镍膜进行标定, 以保证磁矩测量准确性。

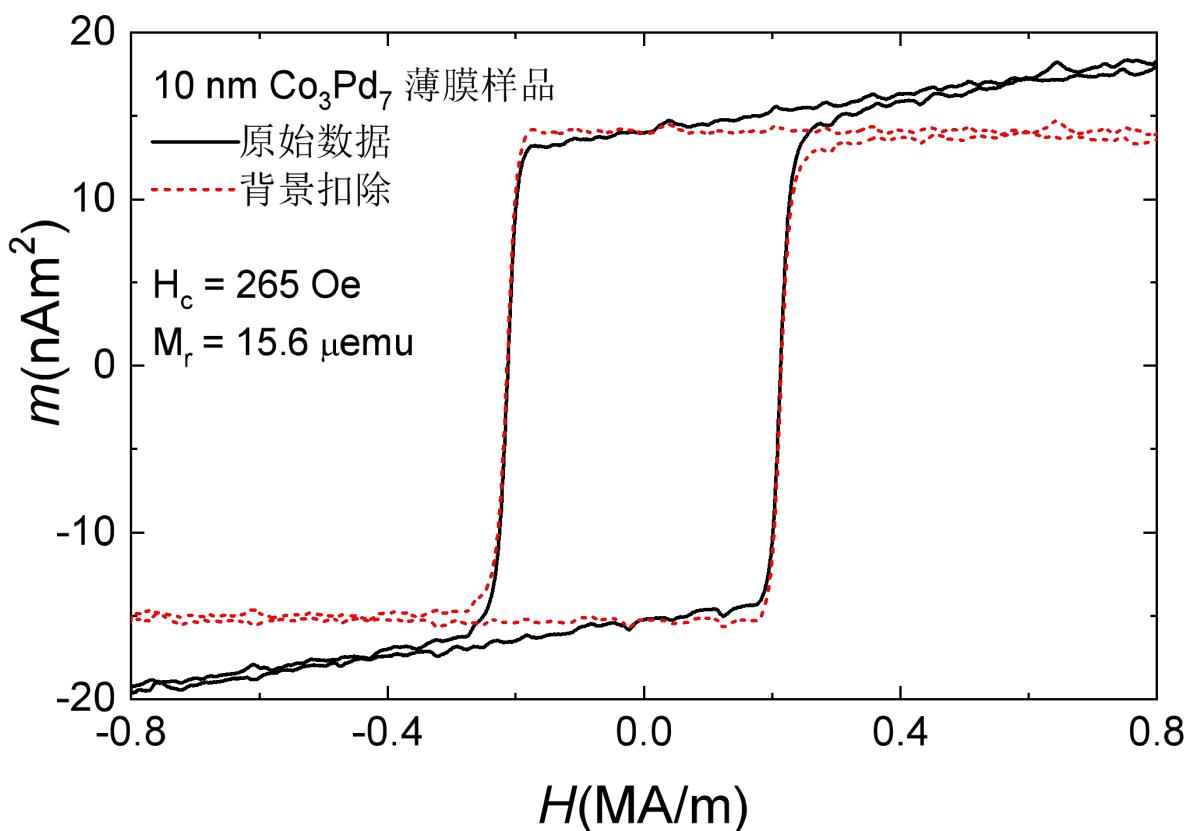


图 C. 2 弱磁矩样品测试结果

C. 3 软磁粉末或磁流体

软磁粉末材料的振动样品磁强计测试。用内径为3 mm高约为10 mm的塑料管，装入10 mg—20 mg粉末状的样品，用有机玻璃杆(外径略小于3 mm)插进塑料管后并用力压实，形成一1 mm—2 mm厚的圆柱体，安装到振动杆上便可进行测量。温度： 20 ± 3 $^{\circ}\text{C}$ ；MH扫场范围： ± 15 kOe(1.2 MA/m)；振动频率：56.7 Hz；振动幅度：1 cm。结果曲线如图C.3所示，矫顽场约3 KOe(238.7 A/m)。如果样品是磁流体，可采用粉末状样品的安装方法或在样品杆端部小平面上滴一滴试样，用一小纸片盖上，会自然形成一薄片形状，安装到振动杆上便可进行测量。

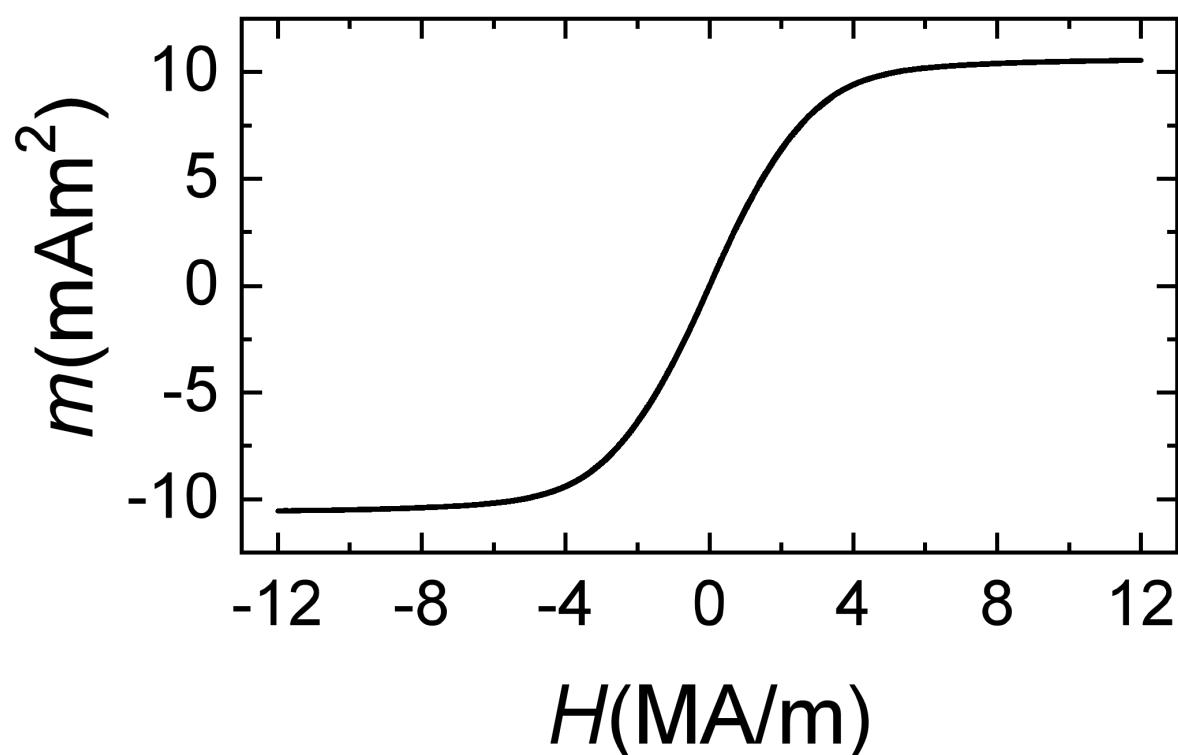


图 C.3 软磁粉样品测试结果

附录 D
(规范性)
磁矩量的定标

D. 1 概述

传统的VSM校准方案主要包括比较法与斜率法两种VSM校准方法：比较法是以标准镍球的饱和磁矩作为参考对象，进行磁矩定标；斜率法是用磁导率超过2000的材料，利用欠饱和时退磁场让磁矩相对外磁场的变化率基本恒定的特性，对磁矩与外磁场两个量同时关联校正，不仅能对线圈的探测灵敏度系数进行测量，还可以同时对VSM的磁场传感器进行校准。比较法与斜率法方案的应用过程如公式D.1所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} M_x = \left(\frac{E_x}{E_s} \right) \left(\frac{D_s^3}{D_x^3} \right) M_s, \text{ 比较法(I)} \\ 4\pi M_x = \left(\frac{\Delta H_c}{\Delta E_c} \right) \left(\frac{D_c^3}{D_x^3} \right) \frac{E_x}{\frac{1}{\mu_r-1} + N} \approx \left(\frac{\Delta H_c}{\Delta E_c} \right) \left(\frac{D_c^3}{D_x^3} \right) \frac{E_x}{N}, \text{ 斜率法(II)} \\ m_x = AI, \text{ 电流法(III)} \end{array} \right. \quad (D.1)$$

正如美国国家标准局NIST建议，比较法很大程度上取决于样品的绝对磁化强度，以及环境条件。相对于比较法，斜率法只需样品磁导率足够高，而对材料磁化的绝对值以及环境条件并不敏感，饱和磁矩的绝对值并不重要的纯铁球就能完成校准。不过需要指出的是，依据斜率法的校准原理，斜率法中样品的尺寸、密度与退磁因子依然是产生校准误差的主要因素，最终导致比较法与斜率法的误差均在0.5%量级。

当样品形状偏理球形，或尺寸较大时，为保证准确性，建议采用形状尺寸类似的镍样品，在一致的取向角度下标定，比如面内边长10 mm、厚0.1 mm的薄膜样品，垂直膜面加磁场测磁矩时，用边长10 mm、厚0.1 mm的镍片替代镍球，同样在垂直膜面方向标定。

D. 2 比较法

由NIST推荐的SRM 772a镍球标样，在加载磁场398 kA/m (5 kOe)，室温(298 K)，名义磁矩值为3.47 mA · m² (3.47 emu)，确切的磁场和温度依赖公式依据SRM 772a推荐公式D2计算：

$$m = 3.47 * [1 + 0.0026 * \ln(H/398)] * [1 - 0.00047 * (T - 298)] \quad (D.2)$$

式中：

其磁矩 m 磁场 H 与温度 T 的单位分别是emu、kA/m与K，在程序内根据VSM磁场探头上测量的磁场及温度计数值代入计算。

VSM的内置磁场传感器经过核磁共振探头定期单独标定以消除零点偏移与系数偏差，安装标准镍球样品施加5 kOe磁场后启动振动头，分别调节X（沿磁场方向）、Y（水平面内垂直于磁场方向）、Z（垂直于水平面）三个方向的旋钮，依据X方向为最小、Y方向和Z方向为最大原则，寻找并固定鞍区中心位置，最后进行标定，完成锁相的电压值与磁矩值之间系数的赋值。

D. 3 斜率法

由于比较法很大程度上取决于样品的绝对磁化强度，以及环境条件，NIST很早就建议斜率法校准，相对于比较法，斜率法只需样品磁导率足够高，而对材料磁化的绝对值以及环境条件并不敏感，饱和磁矩的绝对值并不重要，纯镍球就能完成校准。

斜率法标定应用过程如公式D1-B计算，这种校准方法使用低矫顽力高磁导率的镍球即可。由于通过斜率来关联磁矩和磁场两个量，它可以作为独立的方法用来对磁场进行单独标定，不过需要注意的是，该方法必须在相对较低的场中进行，此时样品因为远离饱和才能保持高磁导率。

D. 4 磁矩线圈法

由于传统校准方案由于依赖材质、磁性球加工、以及环境温度等因素，而且无法做到测量-校准原位，进一步提升其计量不确定度的空间有限，而且，传统校准方案中存在形状尺寸等不容易溯源的参量，更可靠与更低不确定性的新型校准方案亟待研究。

另外，镍球在使用或传递过程中，如果因为力学或热应变导致性能变化，也需要比镍球标准等级更高的方法对其标准磁矩值进行复核或重新赋值，从而延长其使用寿命。

由于线圈本身具有一定的磁性，为了避免背景磁性干扰，电流线圈通常采用差值电流的方法进行标定。利用加载电流与磁矩的线性关系，实现电流对磁矩产生的连续调节，而且磁矩线圈的电流与匝面积分别通过电流量子基准与核磁共振磁强计校准的磁通积分器溯源电流的计量可以一步溯源，从而解决传统VSM校准方案难以避免的材质、加工、非原位与环境依赖的问题，增强VSM校准精度、可原位性、可溯源性。

附录 E
(规范性)
镜像校正

E. 1 概述

当使用电磁铁提供直流磁场进行测量时, 镜像效应可能会影响结果。这种效应通常表现为在高磁场下磁矩信号的降低。这是因为样品的磁偶极场由于磁体的高磁导率极头的存在而失真。这会改变通过线圈的磁通量的大小。在高磁场水平下, 磁极头趋于磁饱和, 磁导率降低, 从而让磁偶极场的畸变减小, 影响到磁矩电压系数的明显改变。

如果总是在相同的外加磁场下进行测量, 则可以在该磁场下校准磁强计, 镜像效应可以忽略。

通过将线圈和样品放置在尽可能远离极头的位置, 可以最小化镜像效应, 然而, 这种解决方案无疑会降低可加载的最大磁场。

E. 2 校正方法

如果镜像效应显著, 则必须在5 kOe以上的高磁场范围内校准仪器, 即需要将校准常数转变外加磁场的函数, 而校准参数随磁场的函数关系, 通过实验的方法进行测定。

具体的操作方法, 是利用镍球的强场饱和磁矩测量的实验测定值与线性外推的理论值求比获得。

参 考 文 献

1. Chen D X,Brug J A,Goldfarb R B. Demagnetizing factors for cylinders. *IEEE Tran. Magn.* , 1991,27:3601~3619
2. Pardo E, Chen D X, and Sanchez A. Demagnetizing factors for square bars, *IEEE Tran. Magn.* ,2004,40:1491~1498