

大块永磁铁低温剩磁测量技术研究*

何永周†

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204)

(2013年7月7日收到; 2013年8月12日收到修改稿)

通过对霍尔探头低温标定系统改进, 建立了大块永磁铁低温剩磁测量系统 (CRMS). 以尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的矩形 NdFeB 永磁铁 (N50M) 为例, 对低温剩磁测量方法进行了研究, 结果表明, 影响低温剩磁测量可靠性主要因素有: 霍尔探头低温标定, 霍尔探头位置, 温度漂移与材料低温热膨胀等. 如果测量方法一样, 永磁铁低温剩磁测量重复性好于 0.1%. 实验为低温波荡器等高精度永磁装置大块永磁铁低温剩磁测量与研究创造了条件.

关键词: 大块永磁铁, 低温剩磁, 测量误差, 低温波荡器

PACS: 75.50.Ww, 07.20.Mc, 75.90.+w, 41.85.Lc

DOI: 10.7498/aps.62.217502

1 引言

永磁铁是当代社会进步重要物质基础之一 [1]. 随着社会技术发展, 永磁铁低温应用逐步受到重视, 低温永磁装置研制时人们关心的问题之一是如何直接测量低温永磁装置用大块永磁铁低温剩磁, 其低温变化规律如何.

永磁铁低温剩磁 (磁矩) 测量装置有综合物性测量系统 (PPMS) 和超导量子磁强计 (SQUID) 等 [2,3], 它们仅能测量小尺寸永磁铁 (一般 $\leq 5.0\text{ mm}$) 剩磁 [4], 测量重复性与准确性和永磁铁样品技术状态、工装、仪器参数设置等密切相关, 需要做相应研究, 才能获得较可靠数据. 大多数商业上应用的永磁铁尺寸 $\geq 5.0\text{ mm}$, 对于高精度永磁装置, 如果是在常温下工作, 一般需要用亥姆霍兹线圈等仪器测试永磁铁的三维剩磁 [5], 有的用霍尔探头测量永磁铁表面磁场. 同样, 对于各种低温永磁装置, 直接测试应用的大块永磁铁 (圆柱形、矩形等) 低温剩磁, 这对高精度低温永磁装置磁场设计与研制是有利的. 目前日本 spring-8 研制了类似装置并用于测量低温波荡器用大块永磁铁低温剩磁 [6].

2013 年 5 月, 为研制低温波荡器样机 [7,8], 中国科学院上海应用物理研究所研制了霍尔探头低温

标定系统, 通过对该装置的改进, 建立了大块永磁铁低温剩磁测量系统 (CRMS), 实现了对大块永磁铁低温剩磁的高精度测量, 本文介绍了这一情况.

2 低温剩磁测量系统

2.1 系统建立

霍尔探头低温标定系统见图 1(a), 对其改进后可建成大块永磁铁低温剩磁测量系统 (CRMS). 主要方法是: 真空与冷却组件、机械支架、数据采集与控制等不变动, 仅在霍尔探头导冷棒上安装优化设计的永磁铁夹具, 使其能引出霍尔探头引线并实现对永磁铁的低温冷却 ($4.2\text{—}300\text{ K}$), 在程序控制下可对永磁铁低温剩磁进行测量 (见图 1):

2.2 低温剩磁

在各种永磁装置中, 绝大多数情况下实际利用的是永磁铁取向剩磁. 永磁铁沿取向均匀饱和状态磁化后, 由分子环流假设知: 外部空间中任意一点磁场由永磁体内排列整齐的无数分子电流环共同激发, 体内分子电流的效应相互抵消, 永磁铁宏观上表现为只有表面电流存在, 这样可认为永磁铁外部空间任意一点磁场仅由表面闭合电流环路所激发 [9] (见图 2).

* 上海市自然科学基金 (批准号: 11ZR1445500) 和国家自然科学基金 (批准号: 11175238) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: heyongzhou@sinap.ac.cn

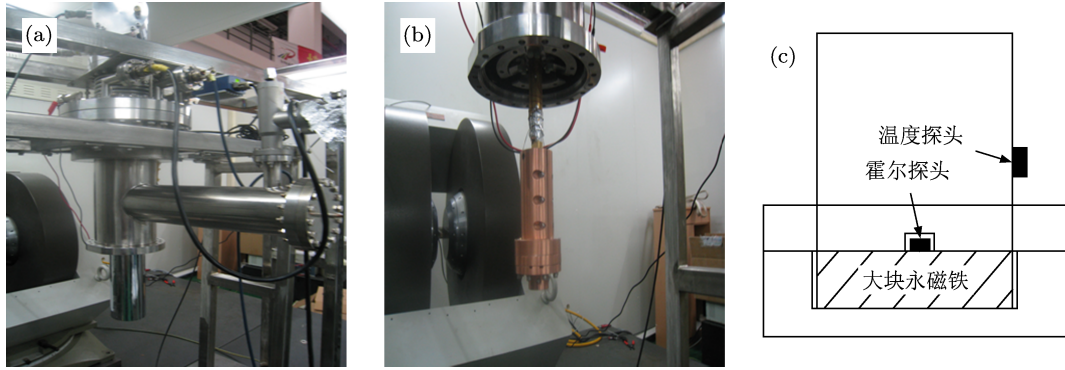


图1 CRMS (a) 霍尔探头低温标定系统; (b) 永磁铁夹具; (c) 永磁铁放置位置

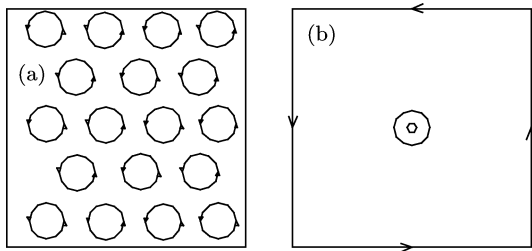


图2 永磁铁分子电流 (a) 体内; (b) 表面 (圆点为磁力线方向)

设矩形永磁铁 a, b 和 h 三个方向为 x, y 和 z , 三面交点为坐标原点 o , 表面环路电流为 I (面电流密度 $j = I/h$). 外部空间任意点 $P(x, y, z)$, 电流环产生磁场 dB_x, dB_y, dB_z 总磁场为

$$\begin{aligned} B &= B_x i + B_y j + B_z k \\ &= \int_0^h dB_x i + dB_y j + dB_z k. \end{aligned} \quad (1)$$

矩形永磁铁磁化方向中心线的 dB_x 和 dB_y 呈现对称性分布, 叠加抵消为 0, 只有垂直永磁铁表面中心的 dB_z 分量, 依据毕奥·萨伐尔定理^[9], 电流环可以分为四段, 每段磁场为 $dB_{zi} (i = 1, 2, 3, 4)$, $i = 1$ 时,

$$\begin{aligned} dB_{z1} &= \frac{\mu_0 j d z_0}{4\pi} \\ &\times \int_0^b \frac{(a-x) dy_0}{[(x-a)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{3/2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

x_0, y_0, z_0 表示永磁铁内部点, μ_0 为真空磁导率, 为表述简单引入

$$\begin{aligned} K &= \frac{\mu_0 j}{4\pi}, \\ \psi_i &= (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \\ &= \frac{\varphi_i}{(\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)^{3/2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

这样可以得到

$$dB_z = dB_{z1} + dB_{z2} + dB_{z3} + dB_{z4}$$

$$\begin{aligned} &= K \int_0^a \psi_2(x-x_0, y, z-z_0) dx_0 \\ &- K \int_0^a \psi_2(x-x_0, y-b, z-z_0) dx_0 \\ &+ K \int_0^b \psi_1(x, y-y_0, z-z_0) dy_0 \\ &- K \int_0^b \psi_1(x-a, y-y_0, z-z_0) dy_0. \end{aligned} \quad (4)$$

引入如下函数记号:

$$\begin{aligned} \phi(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) &= \arctan \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_2} \frac{\varphi_3 - z_0}{\sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + (\varphi_3 - z_0)^2}} \right], \\ y &\neq 0, \\ \phi(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) &= 0, \quad y = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

于是永磁铁在磁化方向中心线外部任意点 $P(x, y, z)$ 产生的总磁场为

$$\begin{aligned} B_z &= \int_0^h dB_z \\ &= -K [\phi(y, a-x, z) + \\ &\phi(b-y, a-x, z) \\ &+ \phi(x, b-y, z) + \phi(a-x, b-y, z) \\ &+ \phi(b-y, x, z) + \phi(y, x, z) \\ &+ \phi(a-x, y, z) + \phi(x, y, z)] \Big|_0^h. \end{aligned} \quad (6)$$

$[\cdot]_0^h$ 函数表示在 $z_0 = h$ 和 $z_0 = 0$ 之间差值, 磁化方向表面中心点 $(x = a/2, y = b/2, z = h)$ 磁场

$$\begin{aligned} B_z &= -4K \left[\phi\left(\frac{a}{2}, \frac{b}{2}, h\right) + \phi\left(\frac{b}{2}, \frac{a}{2}, h\right) \right] \\ &= \frac{\mu_0 j}{\pi} \left[\arctan \frac{a}{b} \frac{h}{\sqrt{a^2/4 + b^2/4 + h^2}} \right. \\ &\quad \left. + \arctan \frac{b}{a} \frac{h}{\sqrt{a^2/4 + b^2/4 + h^2}} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

$j = M_r, B_r = \mu_0 M_r$, 得到永磁铁表磁与剩磁关系为

$$B_r = \frac{B_z \pi}{\arctan \frac{a}{b} \frac{h}{\sqrt{a^2/4 + b^2/4 + h^2}} + \arctan \frac{b}{a} \frac{h}{\sqrt{a^2/4 + b^2/4 + h^2}}}, \quad (8)$$

B_r 和 B_z 分别表示剩磁和磁化方向表面中心点表磁, a, b 和 h 表示长、宽和磁化方向尺寸.

2.3 低温剩磁测量

测试永磁铁样品是 NdFeB(N50M), 尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (取向 10.0 mm), 共 4 件: 1#, 2#, 3#, 4#. 为验证测量可重复性, 把未经低温标定的霍尔探头粘贴在 1# 样品磁化方向表面中心, 温度下降进程: $293 \rightarrow 10 \text{ K}$, $293 \rightarrow 10 \text{ K}$, $265 \rightarrow 10 \text{ K}$, 温度上升进程: $10 \rightarrow 293 \text{ K}$, $10 \rightarrow 265 \text{ K}$, 结果如图 3 (电压表示剩磁). 从图 3 可以看出, 温度上升进程和温度下降进程, 剩磁-温度曲线重复性分别 $\leq 0.056\%$ 和 $\leq 0.02\%$. 二种温度进程曲线峰值点相差 4 K , 这同永磁铁夹具导热性能引起的温度漂移有关.

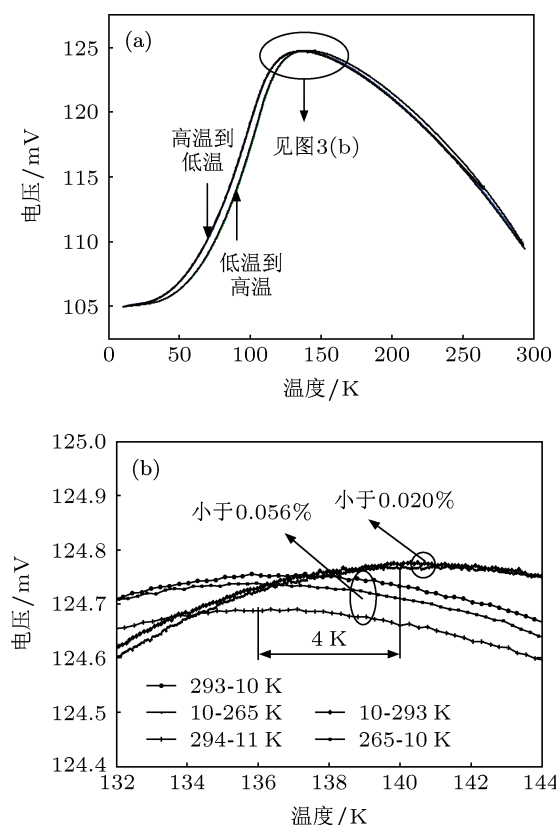


图3 低温剩磁重复性测量 (a) 剩磁-温度; (b) 局部放大

霍尔探头粘贴在永磁铁表面, 再取下时容易损坏导线. 为保证霍尔探头的安全并验证其位置对测量影响, 对安装方式进行了改进, 使霍尔探头和永磁铁表面不直接接触 (预留约 0.2 mm 空间), 然后

按 $293 \rightarrow 10 \text{ K}$ 进程, 对 1# 永磁铁低温剩磁进行测量. 霍尔探头接触与不接触二种测量方法分别得到曲线 1 和曲线 2 (见图 4), 从中可看出, 曲线分为 2 个阶段: 第 1 阶段 ($150 \sim 300 \text{ K}$), 曲线 2 剩磁高于曲线 1; 第二阶段, 曲线 1 剩磁高于曲线 2, 并随温度下降呈增加趋势. 这同永磁铁低温反常热膨胀及其他材料低温收缩有关, 即低温下霍尔探头和永磁铁表面距离变化较大, 这将引起霍尔探头采集的磁场 B 发生变化.

采用霍尔探头不接触方式, 按 $293 \rightarrow 10 \text{ K}$ 进程, 测量 1#, 2#, 3#, 4# 永磁铁低温剩磁, 结果如图 5. 从中可看到, 和常温相比在峰值 136 K 处, 1#, 2#, 3#, 4# 永磁铁剩磁分别增加 13.81% , 14.19% , 13.67% , 14.10% , 剩磁增加幅度不同步性达到 0.52% . 4 件永磁铁常温与低温剩磁绝对值有差别, 这同永磁铁制造技术和霍尔探头相对位置有密切关系.

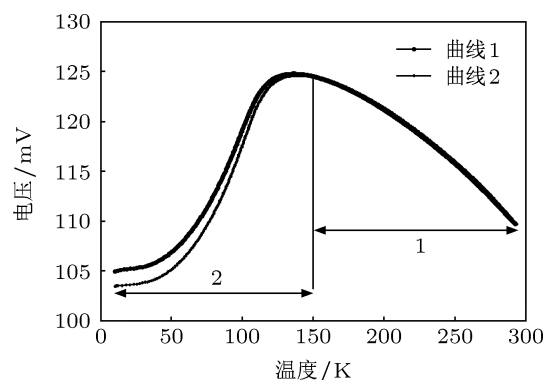


图4 霍尔探头放置位置对测量的影响

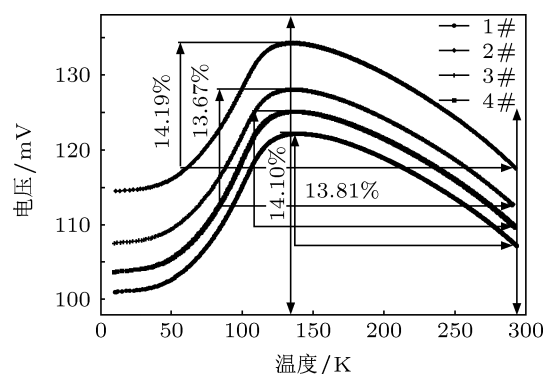


图5 永磁铁低温剩磁的离散型

经过归一化处理的永磁铁低温剩磁实验数据 (霍尔探头贴在 1# 永磁铁的表面) 和 N50M 的

PPMS 测量结果进行核对^[11], 结果见图 6. 从中可看出, 和 PPMS 结果相比, 曲线趋势差距较大, 这说明未经高精度低温标定的霍尔探头用于低温剩磁测量, 数据绝对值与趋势误差较大.

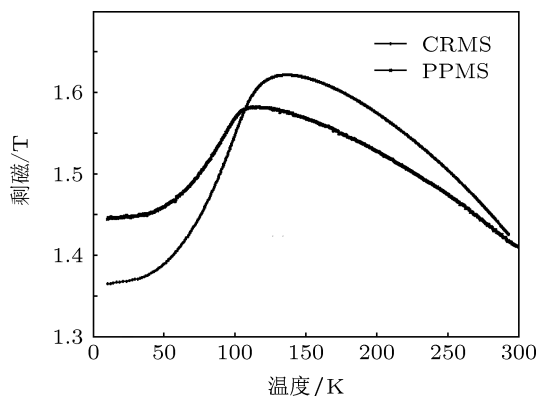


图 6 永磁铁低温剩磁和 PPMS 测量结果的比较

3 结 论

通过霍尔探头低温标定系统改进, 建立了大块永磁铁低温剩磁测量系统 (CRMS). 实验研究表明, 永磁铁夹具导热性所致的温度漂移对测量重复性影响较大, 如测量温度进程一致, 低温剩磁测量重复性 $\leq 0.1\%$. 引起大块永磁铁低温剩磁测量准确性因素有: 霍尔探头低温标定, 霍尔探头位置, 永磁铁夹具导热性能与材料低温热膨胀等. 下一步将对 CRMS 永磁铁夹具等加以改进并优化测量方法, 对霍尔探头进行高精度标定, 测试永磁铁等材料低温热膨胀系数, 以满足低温波荡器等低温永磁装置大块永磁铁低温剩磁高精度测量与研究需要.

作者感谢南京柯德超低温技术有限公司提供的技术支持, 感谢张继东副研究员, 张伟工程师, 王淑华工程师, 研究生钟逸等提供的帮助.

- [1] Zhou S Z, Dong Q F 1999 *Super permanent magnet* (Beijing: Metallurgical Industry Press) p 145 [周寿增, 董清飞 1999 超强永磁体 (北京: 冶金工业出版社) 第 145 页]
- [2] Chen H Y 2000 *Modern Instruments* **5** 7 (in Chinese) [陈海英 2000 现代仪器 **5** 7]
- [3] Wang F W, Zhang P L, Shen B G, Yan Q W 2004 *Chin. Phys.* **13** 0918
- [4] He Y Z, Zhou Q G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044106 (in Chinese) [何永周, 周巧根 2013 物理学报 **62** 044106]
- [5] He Y Z, Zhang J D, Zhou Q G, Qian Z M, Li Y 2010 *AIP Conf. Proc.* **1234** 527
- [6] Hara T, Tanaka T, Kitamura H 2004 *Phys. Rev.* **7** 9
- [7] Chavanne J, Lebec G, Penel C, Revol F 2010 *AIP Conf Proc.* **1234** 25
- [8] Tanaka T, Seike T, Kagamihata A, Schmidt T, Anghel A, Brügger M, Bulgheroni W, Jakob B, Kitamura H 2009 *Phys. Rev.* **12** 1
- [9] He Y Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084105 (in Chinese) [何永周 2013 物理学报 **62** 084105]
- [10] Zhao K H, Chen X M 2003 *Electromagnetism* (Beijing: Higher Education Press) p92 [赵凯华, 陈熙谋 2003 电磁学 (北京: 高等教育出版社) 第 92 页]
- [11] He Y Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 074101

Study on cryogenic remanence measurement technology for chunk permanent magnet*

He Yong-Zhou[†]

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

(Received 7 July 2013; revised manuscript received 12 August 2013)

Abstract

Through improvement of Hall probe cryogenic calibration system, a cryogenic remanence measurement system(CRMS) for chunk permanent magnet was built. With a rectangular NdFeB(N50M) permanent magnet (its size is 40 mm×40 mm×10 mm) as example, cryogenic remanence measurement technology for chunk permanent magnet was studied. Results show that main factors affecting cryogenic remanence measurement reliability are Hall probe cryogenic calibration, Hall probe location, temperature drift, and thermal expansion of the material and so on. If the same methods are used for measurement, then the cryogenic remanence measurement repeatability of a permanent magnet is less than 0.1%. The experimental study creates conditions for measurements and research of cryogenic remanence of chunk permanent magnet of high-precision permanent magnet devices, such as cryogenic undulators.

Keywords: chunk permanent magnet, cryogenic remanence, measurement error, cryogenic undulator

PACS: 75.50.Ww, 07.20.Mc, 75.90.+w, 41.85.Lc

DOI: 10.7498/aps.62.217502

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant No: 11ZR1445500), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No: 11175238).

[†] Corresponding author. E-mail: heyongzhou@sinap.ac.cn