



中华人民共和国国家标准

GB/T 39843—2021/IEC 61788-17:2013

电子学特性测量 大面积超导膜的 局域临界电流密度及其分布

**Electronic characteristic measurements—Local critical current density and its
distribution in large-area superconducting films**

(IEC 61788-17:2013, Superconductivity—Part 17: Electronic characteristic
measurements—Local critical current density and its
distribution in large-area superconducting films, IDT)

2021-03-09 发布

2021-10-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 要求 2

5 装置 2

 5.1 测量设备 2

 5.2 感应测量的部件 3

6 测量步骤 4

 6.1 总则 4

 6.2 实验线圈系数的确定 5

 6.3 超导膜样品 J_c 的测量 7

 6.4 单频率下 J_c 的测量 7

 6.5 理论线圈系数和实验线圈系数的实例 8

7 测量方法的不确定度 9

 7.1 影响 U_3 测量的系统误差的主要来源 9

 7.2 线圈-超导膜距离与预定值偏离的影响 10

 7.3 实验线圈系数和 J_c 的不确定度 10

 7.4 超导膜的边缘效应 10

 7.5 试样保护 11

8 测试报告 11

 8.1 测试样品的标识 11

 8.2 J_c 值的报告 11

 8.3 测试条件报告 11

附录 A (资料性附录) 第 1 章~第 8 章的相关附加信息 12

附录 B (资料性附录) 可选的测量系统 16

附录 C (资料性附录) 不确定度考虑 21

附录 D (资料性附录) 不确定度的评定 25

参考文献 30

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用翻译法等同采用 IEC 61788-17:2013《超导电性 第 17 部分:电子学特性测量 大面积超导膜的局域临界电流密度及其分布》。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下:

——GB/T 2900.100—2017 电工术语 超导电性(IEC 60050-815:2015,IDT)。

本标准做了下列编辑性修改:

——修改了标准名称;

——将 IEC 61788-17:2013 的 A.8、B.3、C.5、D.7 归入参考文献,其在文中的引用也做了相应调整;

——更改了 IEC 61788-17:2013 中术语和定义引用的版次,并将规范性引用文件中 IEC 60050(所有部分)修改为 IEC 60050-815;

——对 IEC 61788-17:2013 个别条款中出现的编辑性错误做了修改。

本标准由中国科学院提出。

本标准由全国超导标准化技术委员会(SAC/TC 265)归口。

本标准起草单位:上海大学、电子科技大学、上海上创超导科技有限公司、中国科学院物理研究所。

本标准主要起草人:蔡传兵、刘志勇、李洁、李敏娟、张永军、陶伯万、郭艳群、白传易、熊杰。

引 言

自 1986 年发现以来的 30 多年里,高温超导体在产品和技术上已有许多应用,这将引起信息传输、交通和能源领域的变革。其中,利用超导体极低表面电阻这一特性的高温超导(HTS)微波滤波器已经商品化。与常规滤波器相比,超导滤波器有两个主要优势,即:低插入损耗(低噪声特征)和高频率选择性(边带陡峭)^[1]。这些优势能够减少基站的数量,改善通话质量,更有效地使用频率带宽,并减少不必要的无线电波噪声。

大面积超导膜已用于微波器件^[2],也用于新兴超导电力设备,如电阻型超导故障限流器(SFCLs)^[3-5]、触发型超导故障限流器的超导故障检测^[6,7]和闭环运行高温超导磁体的持续电流开关^[8,9]。临界电流密度 J_c 是描述大面积高温超导膜质量的关键参数之一。无损交流感应法被广泛用于测量大面积高温超导膜的 J_c 及其分布^[10-13],其中最普遍的是利用三次谐波电压 $U_3 \cos(3\omega t + \theta)$ 的方法,式中 ω 、 t 和 θ 分别表示角频率、时间和初始相位。然而,这些传统的方法并不准确,因为未考虑到 J_c 测量的电场强度 E 判据^[14,15]。 J_c 由电流阈值 I_{th} 计算得到,而有时确定 I_{th} 所使用的电场判据并不合适^[16]。传统的方法获得的 J_c 值与精确值相比有 10% 到 20% 的误差^[15]。因此有必要建立标准的测试方法以准确测量局域的临界电流密度及其分布,所有涉及高温超导滤波器的行业可以参考此标准进行高温超导膜的质量控制。有关感应法测量高温超导膜 J_c 的背景知识归纳总结在附录 A。

这些感应测试法中,在超导膜正上方的小线圈内通入交流电流 $I_0 \cos \omega t$ 从而产生交变磁场,可以通过磁场完全穿透超导膜时的线圈电流阈值 I_{th} 计算出 J_c ^[17]。对于使用三次谐波电压 U_3 的感应法,测量中 U_3 是 I_0 的函数,当 U_3 开始出现时线圈中的电流 I_0 定义为 I_{th} 。当 $I_0 = I_{th}$ 时,超导膜感应电场强度 E 与交流电流频率 f 成正比,可以通过简化的 Bean 模型进行估算^[14]。本标准提出了一种基于电场强度判据,通过不同频率下精确测量的 I_{th} 值检测 U_3 、获取 n -值(E - J 特性曲线的幂指数),实现 J_c 精确测量的方法^[14,15,18,19]。这种方法不仅能获得精确的 J_c 值,而且还有助于发现非均匀样品性能退化的部分,因为性能退化部分 n -值的下降比 J_c 更明显^[15]。尽管微波器件设计的关键参数是表面电阻而不是 J_c ,但需要注意的是此标准测试方法可以很好地评定大面积高温超导膜 J_c 的均匀性。对 SFCLs 应用而言,知晓 J_c 分布至关重要,因为 J_c 的分布差异严重影响到 SFCLs 故障时的失超点分布。

本文件的发布机构提请注意,声明符合本文件时,本文件的引言、第 1 章、第 4 章和 5.1 中相关内容涉及一条专利的使用,该专利保护的技术内容为不同频率下感应法测量 J_c 及确定 E - J 特性。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

专利持有人已向国际电工委员会(IEC)保证,他愿意同全世界的申请人就专利授权许可免费进行谈判。该专利持有人的声明已经在 IEC 备案。相关信息可以通过以下联系方式获得:

专利持有人:

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

地址:

Intellectual Property Planning Office, Intellectual Property Department

1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki Prefecture, Japan

请注意除上述专利外,本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

电子学特性测量 大面积超导膜的 局域临界电流密度及其分布

1 范围

本标准规定了用三次谐波电压感应法测量大面积高温超导(HTS)膜局域临界电流密度(J_c)及其分布的方法。精确测量中最重要的因素是通过电场强度判据确定液氮温区的 J_c 值和通过 J_c 的频率依赖关系获得电流-电压特性。尽管可以在有直流磁场的情况下测量 J_c ^[20,21],但是本标准仅适用于没有直流磁场的情况。

本标准实质上测量的是超导膜临界面电流,即 J_c 与超导膜的厚度 d 的乘积。高温超导膜的 $J_c d$ 的测量范围和测量分辨率如下:

- $J_c d$:从 200 A/m~32 kA/m(依据实验结果,不限于);
- 分辨率:100 A/m(依据实验结果,不限于)。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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。

IEC 60050-815 国际电工术语 第 815 部分:超导电性(International electrotechnical vocabulary—Part 815:Superconductivity)

3 术语和定义

IEC 60050-815:2015 界定的术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 IEC 60050-815:2015 中的某些术语和定义。

3.1

临界电流 critical current

I_c

在超导体中,可视为几乎是无阻流动的最大直流电流。

注: I_c 是磁场强度、温度和应变的函数。

[IEC 60050-815:2015, 定义 815-12-01]

3.2

临界电流判据 critical current criterion

I_c 判据 I_c criterion

根据电场强度 E 或电阻率 ρ 确定临界电流 I_c 的判据。

注:常用的电场判据为 $E = 10 \mu\text{V/m}$ 或 $E = 100 \mu\text{V/m}$;电阻率判据为 $\rho = 10^{-14} \Omega \cdot \text{m}$ 或 $\rho = 10^{-13} \Omega \cdot \text{m}$ 。

[IEC 60050-815:2015, 定义 815-12-02]

3.3

临界电流密度 critical current density

J_c

通过导体的电流为临界电流时,导体全截面上的电流密度;或当有稳定材料时,导体中非稳定材料部分截面上的电流密度。

注:导体全截面上的电流密度又称工程电流密度(符号: J_e)。

[IEC 60050-815:2015, 定义 815-12-03]

3.4

传输临界电流密度 **transport critical current density**

J_{ct}

由电阻率或电压测量得到的临界电流密度。

[IEC 60050-815:2015, 定义 815-12-04]

3.5

n -值(超导体) **n -value<superconductor>**

在特定的电场强度或电阻率区间,超导体的电压-电流曲线 $U(I)$ 可近似表示为 $U \propto I^n$, 其中 I 的幂指数就是超导的 n -值。

[IEC 60050-815:2015, 定义 815-12-10]

4 要求

临界电流密度 J_c 是描述大面积高温超导膜性能的最基本参数之一。在本标准中, J_c 及其分布是通过检测三次谐波电压 $U_3 \cos(3\omega t + \theta)$ 这种非破坏性感应法测得的。用安装在 HTS 膜正上方的小线圈扫描测量区域, 该线圈可产生交变磁场并且检测三次谐波电压。为了精确测量某一电场强度判据下的 J_c , 应反复测量不同频率下线圈电流阈值 I_{th} , 即 U_3 刚开始出现时的线圈电流, 并从其频率依赖关系中获得 E - J 特性。

此方法测定 J_c 绝对值的目标相对合成标准不确定度小于 10%, 而测定大面积超导膜 J_c 分布均匀性时的目标相对合成标准不确定度小于 5%。

5 装置

5.1 测量设备

图 1 为一个三次谐波电压测量方法的典型电路的示意图。该电路由信号发生器、功率放大器、测量线圈电流的数字万用表(DMM)、降低基波信号的带阻滤波器、测量三次谐波电压信号的锁相放大器组成。所涉及的单线圈法, 其线圈可产生交变磁场并检测感应电压。这种方法也可以应用到双面超导膜。然而在这里提及的方法中, 需要一个额外的系统, 以减小由信号发生器和功率放大器产生的谐波噪声电压^[14]。如图 1 示例, 加一个与样品线圈规格相同的线圈作为抵消线圈。样品线圈安装在待测超导膜样品正上方; 而抵消线圈下方放置一片 $J_c d$ 值远大于待测样品的超导膜, 其可将抵消线圈的电感调整到等于样品线圈的电感。线圈和超导膜都浸没在液氮中(图 1 中虚线内)。其他可选的测量系统参见附录 B。

注: 在这个电路中, 当使用表 1(参见 6.5)线圈 1 或线圈 2 时, 为了测量 $J_c d \approx 10$ kA/m 的超导膜, 需要线圈电流有效值约 0.1 A 和电源电压有效值大于 6 V。要提供这么大的电流和电压, 有必要使用功率放大器, 例如 NF:HSA4011。

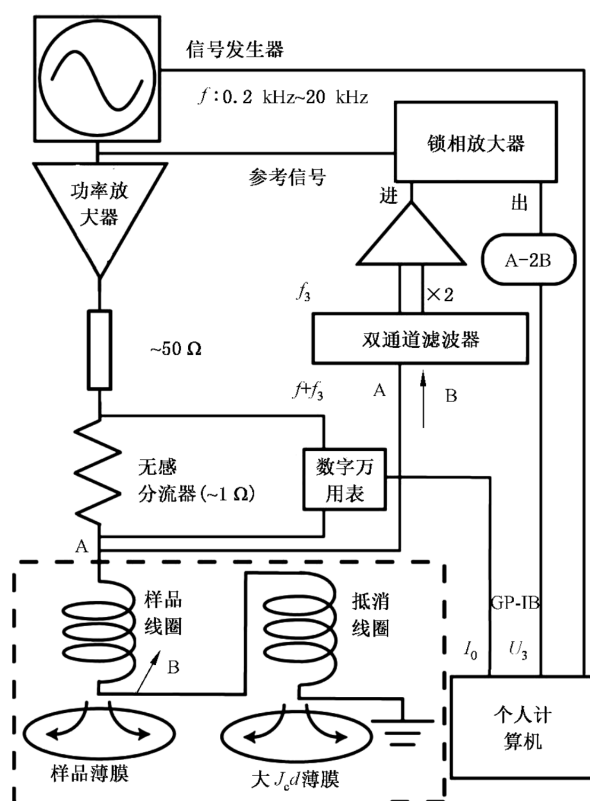


图 1 感应法测量高温超导膜 J_c 的电路示意图

5.2 感应测量的部件

5.2.1 线圈

目前,能够制备的大面积高温超导膜的直径可达 25 cm。商业上用于制备微波滤波器的直径约为 5 cm^[22]。直径为约 10 cm 和面积为 2.7 cm × 20 cm 的大面积 YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) 超导膜被用来制造 SFCLs 模块^[3-5]。测量这类超导膜的 J_c , 宜选用外径 2 mm 到 5 mm 之间的样品线圈。为了在超导膜上表面产生尽可能高的磁场, 样品线圈适宜采用扁平几何结构。典型的规格如下:

- a) 线圈内径 D_1 : 0.9 mm, 外径 D_2 : 4.2 mm, 高度 h : 1.0 mm, 直径 50 μm 的铜线绕 400 匝。
b) 线圈内径 D_1 : 0.8 mm, 外径 D_2 : 2.2 mm, 高度 h : 1.0 mm, 直径 50 μm 的铜线绕 200 匝。

5.2.2 隔离膜

通常,用厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}\sim 125\text{ }\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺膜保护高温超导膜。一般在线圈绕组底部有一些保护层,这也使超导膜与线圈中的焦耳热实现隔离。保护层典型的厚度是 $100\text{ }\mu\text{m}\sim 150\text{ }\mu\text{m}$,并且线圈与超导膜的距离 Z_1 一般保持在 $200\text{ }\mu\text{m}$ 。

5.2.3 线圈装配

保持线圈绕组的底部与超导膜的间距为规定值 Z_1 , 样品线圈应以足够强度压在超导膜上, 通常压力约在 0.2 MPa 以上^[18]。为此, 需要一重物或弹簧, 如图 2 所示。左图是实现超导膜大范围扫描的系统示意图。在测量 U_3 之前, 线圈先是上升一段距离, 然后横向移动到目标位置, 最后下降压在超导膜上。应选择一个适当的压力, 过高的压力会损害线筒、线圈、高温超导膜或衬底。据报道, 20 MPa 的横

向压应力作用会使沉积在双轴织构纯镍基底上的 YBCO 性能退化^[23]。

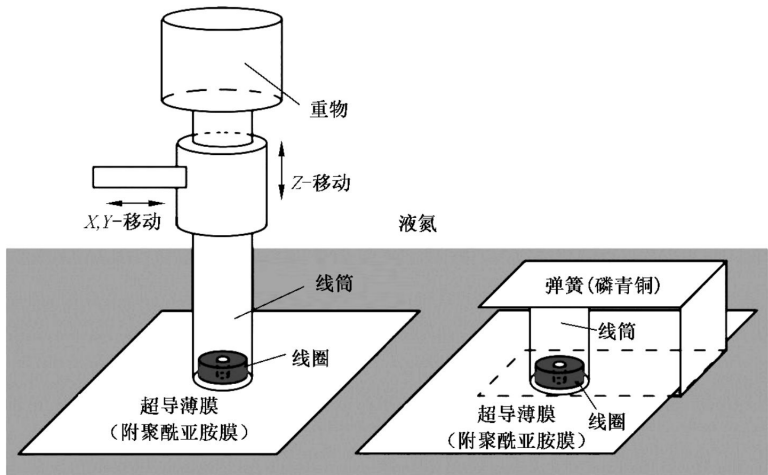


图 2 样品线圈压向高温超导膜的技术图解

5.2.4 校准晶片

校准晶片用于确定下一节要介绍的实验线圈系数 k' 。它是由均匀的大面积(直径通常约 5 cm) YBCO 超导膜制成的。晶片上同时有用于传输法测量的微桥和用于感应法测量的区域(见图 3)。传输微桥的典型尺寸是宽 $20\ \mu\text{m}\sim 70\ \mu\text{m}$,长 $1\ \text{mm}\sim 2\ \text{mm}$,可以通过紫外线光刻技术或激光蚀刻获得^[24]。

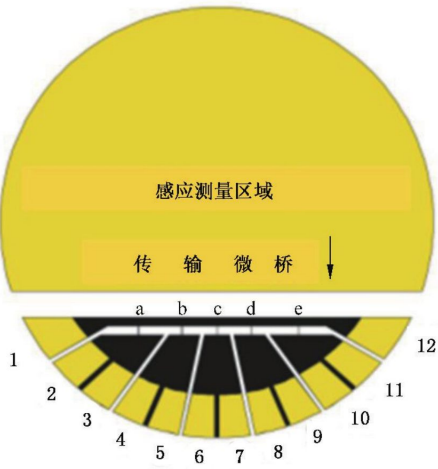


图 3 用于确定实验线圈系数的校准晶片示例

6 测量步骤

6.1 总则

确定实验线圈系数 k' 及测量待测超导膜 J_c 的步骤如下,其中 k' 的含义参见附录 A 中的 A.5。

6.2 实验线圈系数的确定

6.2.1 理论线圈系数 k 的计算

通过式(1)计算理论线圈系数 $k = J_c d / I_{th}$:

$$k = F_m \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

F_m —— $F(r)$ 的最大值;

$F(r)$ —— r 的函数;

r —— 离中心轴线的距离(见图4)。

线圈因子函数 $F(r) = -2H_r(r, t) / I_0 \cos \omega t = 2H_0 / I_0$ 由式(2)获得:

$$F(r) = \frac{N}{2\pi S} \int_{R_1}^{R_2} dr' \int_0^{2\pi} d\theta \int_{Z_1}^{Z_2} dz \frac{r' z \cos \theta}{(z^2 + r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta)^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

N —— 线圈匝数;

$S = (R_2 - R_1)h$ —— 截面积;

$R_1 = D_1/2$ —— 线圈内半径;

$R_2 = D_2/2$ —— 线圈外半径;

Z_1 —— 线圈-超导膜间距;

$Z_2 = Z_1 + h$ [17]。

式(2)的推导参见附录 A 中的 A.3。

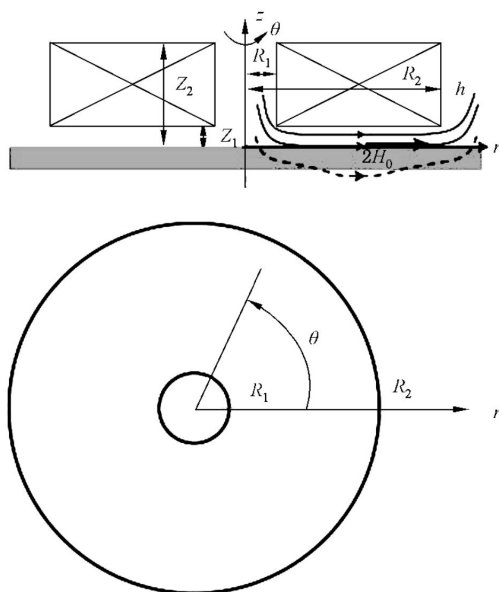


图4 样品测量过程中线圈和磁场示意图

6.2.2 校准晶片上微桥的传输测量

测量步骤如下:

a) 利用四引线法测量校准晶片上微桥的 E - J 特性关系曲线,并获得其幂指数规律:

$$E_t = A_{0t} \times J^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

b) 对至少3个不同的微桥进行重复测量。图5上部(E 值较大区域)显示了3个桥的三组测量数

据($n=20.5\sim 23.8$)。

6.2.3 校准晶片的 U_3 测量

测量步骤如下：

- 在三到四种频率下，测量校准晶片感应测量区的 U_3 与线圈电流的关系，并使用恒电感判据（即 $U_3/fI_0=2\pi L_c$ ）获得实验 I_{th} 。为了能使用简化式(4)计算电场[参见 7.1 c)和附录 D 中的 D.2]，在具有足够大信噪比 S/N 的范围内，判据 L_c 宜尽可能地小。图 6 显示了 $2\pi L_c=2\mu\Omega\cdot s$ 的一个测量实例。
- 对超导膜上至少三个点进行重复测量。

6.2.4 基于 I_{th} 的频率依赖数据计算 $E-J$ 特性

计算步骤如下：

- 使用不同频率下获得的 I_{th} 和 6.2.1 中计算得到的理论线圈系数 k ，确定超导膜的 $J_{c0}(=kI_{th}/d)$ ，并通过下式计算刚好完全穿透时超导膜中平均的感生电场 E ，式(4)的推导参见附录 A 中的 A.4。

$$E_{avg} \approx 2.04\mu_0 f d^2 J_{c0} = 2.04\mu_0 k f d I_{th} \quad \dots\dots\dots (4)$$

- 通过 E_{avg} 和 J_{c0} 关系，获得 $E-J$ 特性关系数据：

$$E_i = A_{0i} \times J^n \quad \dots\dots\dots (5)$$

并与传输 $E-J$ 特性数据绘制在同一图中。图 5 中虚线显示了超导膜的三个点的三组测量数据。传输数据和 U_3 感应数据在此阶段并未匹配。

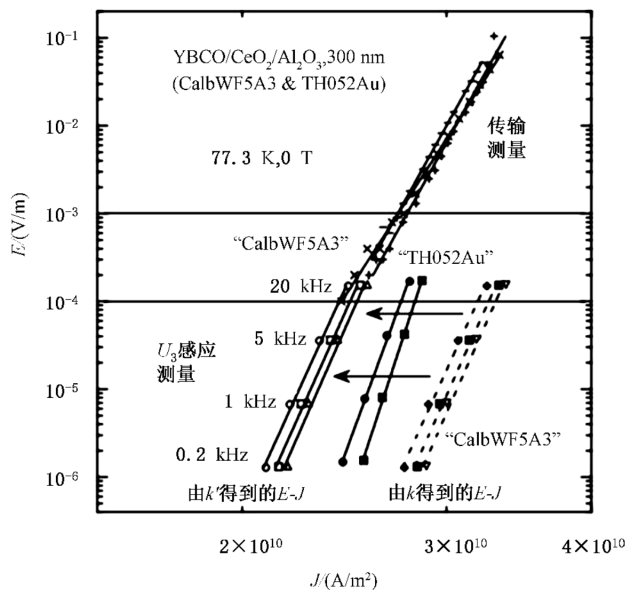


图 5 传输法和 U_3 感应方法测定的 $E-J$ 特性曲线

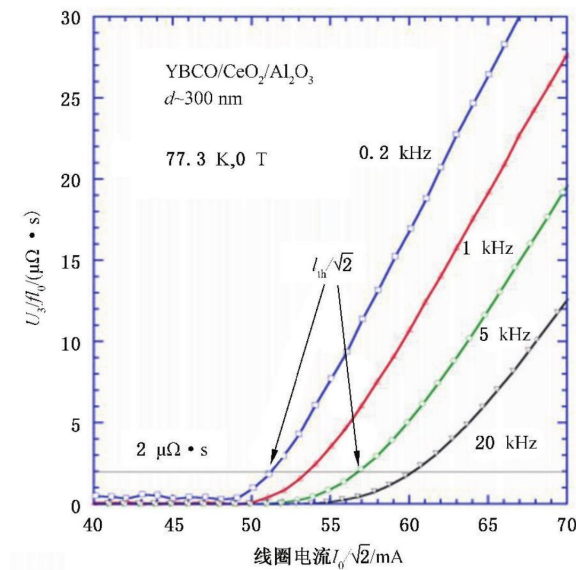


图 6 不同频率下归一化三次谐波电压(U_3/fI_0)的测量实例

6.2.5 基于 J_{ct} 和 J_{c0} 值确定 k'

步骤如下：

- a) 在传输 E - J 曲线和感应 E - J 曲线之内(或附近),选择合适的电场强度,例如图 5 中的 $200\text{ }\mu\text{V/m}$ 。
- b) 在此电场下,利用式(3)和式(5)分别计算传输临界电流密度 J_{ct} 和感应临界电流密度 J_{c0} 。
- c) 通过 $k'=(J_{ct}/J_{c0})k$ 确定实验线圈系数 k' ,其中 J_{ct} 和 J_{c0} 分别表示的是获得的 J_{ct} 和 J_{c0} 的平均值。如果绘制 $J_c=k'I_{th}/d$ 和 $E_{avg}=2.04\text{ }\mu_0 k f d I_{th}$ 的对应曲线,可看出通过 U_3 测量的 E - J 特性曲线与通过传输法测量数据有良好的匹配(图 5)。

6.3 超导膜样品 J_c 的测量

测量步骤如下：

- a) 在两个、三个或四个频率下,测量超导膜样品的 U_3 ,并采用 6.2.3 相同的判据 L_c 获得 I_{th} 。
- b) 利用获得的实验线圈系数 k' 来计算每个频率下的 $J_c(=k'I_{th}/d)$,并获得 J_c 与 E_{avg} 的依赖关系 $[=2.04\text{ }\mu_0 k f d I_{th}$,由于被低估而使用 k ,参见 7.1c)]。图 5 中也同时显示了一个 n -值(36.0 和 40.4)超过校准晶片($n=28.0\sim 28.6$)的样品(TH052Au,实心符号)的 E - J 特性实例。
- c) 依据所测得的 E - J 特性曲线,选取合适的电场强度判据,如 $E_c=100\text{ }\mu\text{V/m}$,计算 J_c 值。
- d) 对比测量三到四个频率有利于通过检验 E - J 幂指数特性确认测量和采样的有效性。为节省时间,常规测量可以选择两个频率。

6.4 单频率下 J_c 的测量

如第 1 章和第 3 章中提到的, J_c 是电场的函数。建议采用多频率测试方法,使用 6.2 和 6.3 中所述的程序步骤,利用恒定电场判据测定 J_c 值。由于单一频率的测量简单、成本低,因此在有些情况下也是需要的。在这种情况下,可通过以下步骤测量,并利用不同电场判据获得 J_c ：

- a) 利用式(1)计算理论线圈系数 k 。
- b) 通过 6.2.2 步骤获得校准晶片传输微桥的 E - J 特性曲线[式(3)]。

- c) 在单一频率下测量校准晶片感应测量区的 U_3 与线圈电流的依赖关系,使用恒电感判据($U_3/fI_0=2\pi L_c$)获得实验 I_{th} 。为了能使用 6.2.4 中的简化式(4)计算电场,在足够大信噪比 S/N 的范围内,判据 L_c 宜尽可能地小。计算 $J_{c0}(=kI_{th}/d)$ 并通过式(4)计算磁场刚好完全穿透时超导膜中的平均感生电场 E_{avg} 。至少测量超导膜表面的三个不同点,获得平均 J_{c0} 及 E_{avg-U3} 。
- d) 利用式(3)给出的 $E-J$ 传输特性,计算与 c) 中获得的电场 E_{avg-U3} 对应的 J_{ct} 值。
- e) 通过 $k'=(J_{ct}/J_{c0})k$ 确定实验线圈系数 k' 。
- f) 测量样品同一频率下的 U_3 ,使用 c) 中的相同判据 L_c 获得 I_{th} 。利用实验线圈系数 k' 计算 $J_c(=k'I_{th}/d)$ 。利用式(4)计算 E_{avg} ,并且每个 E_{avg} 值都应有一个对应的 J_c 值。

6.5 理论线圈系数和实验线圈系数的实例

表 1 显示了典型的样品线圈的理论线圈系数和实验线圈系数(k 和 k')、线圈规格参数和确定 I_{th} 所推荐的恒电感判据 $2\pi L_c=U_3/fI_0$ 。需要注意的是 k' 依赖于使用的 L_c 判据。线圈 1 使用直径为 $50\ \mu\text{m}$ 的自粘聚氨酯漆包铜线绕制,线圈 2 和线圈 3 使用直径为 $50\ \mu\text{m}$ 聚氨酯漆包铜线绕制。表 1 也给出了在 77.3 K 下测量的电阻和当超导膜放置在线圈下面时计算的自感。线圈与超导膜的间距 Z_1 固定值 0.2 mm。图 7 是线圈 1 和 3 的示意图,三个线圈的线圈因子函数 $F(r)$ 表明磁场峰值位于线圈的平均半径附近(图 8)。

表 1 典型样品线圈的规格参数和线圈系数

线圈	D_1 mm	D_2 mm	h mm	匝数	k 1/mm	k' 1/mm	U_3/fI_0 $\mu\Omega\cdot\text{s}$	R Ω	L mH
1	0.9	4.2	1.0	400	106.6	82.2	2	4.1	0.165
2	1.0	3.6	1.0	400	117.4	89.1	2	3.4	0.163
3	0.8	2.2	1.0	200	63.2	47.0	0.6	1.6	0.028

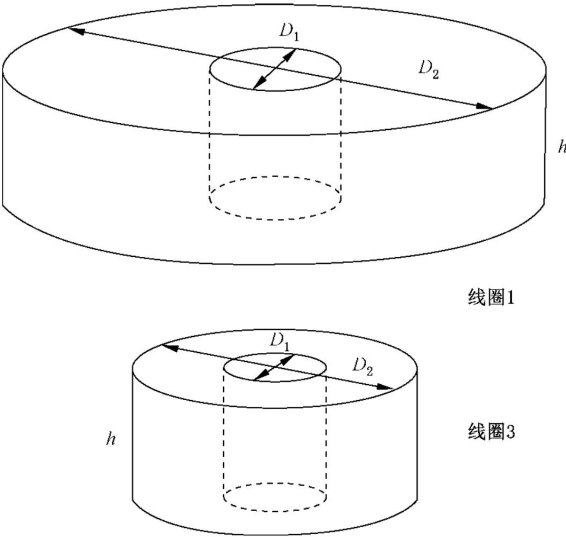


图 7 表 1 中线圈 1 和线圈 3 的示意图

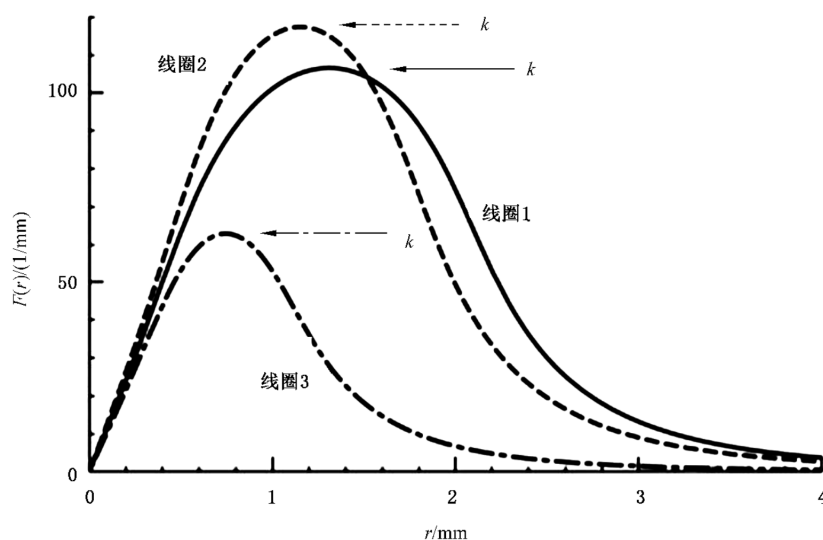


图 8 三个线圈的线圈因子函数 $F(r)=2H_0/I_0$ 计算值

7 测试方法的不确定度

7.1 影响 U_3 测量的系统误差的主要来源

U_3 测量中最显著的系统误差主要是来自于线圈-超导膜的实际距离 Z_1 与预设值的偏差。因为该方法中 $J_c d$ 测量值与超导膜上表面的磁场成正比,因此距离 Z_1 的偏差将直接影响测量结果。“不确定度”的概念参见附录 C。以下列出了不确定度的主要来源:

a) 线圈未充分压到超导膜

由于测量是在液氮中进行的,放置在高温超导膜上面的聚酰亚胺膜会变脆,液氮可能进入聚酰亚胺和高温超导膜之间的空隙中。因此,有必要施加足够的压力以保持聚酰亚胺膜平坦并避免 Z_1 的偏差。实验表明,所需的压力值约为 0.2 MPa^[18]。这里要注意的是,聚酰亚胺膜在液氮温度下的热收缩小于 $0.002 \times (300 - 77) \approx 0.45\%$,由热膨胀影响带来的距离误差约为 $0.2 \mu\text{m} \sim 0.6 \mu\text{m}$,与线圈-超导膜的距离(约 200 μm)相比,该误差可以忽略^[25]。

b) 线圈与聚酰亚胺膜之间形成冰层

液氮不可避免地会带入粉末状的冰。当线圈扫描大面积 HTS 膜时需要长时间的移动,聚酰亚胺膜和样品线圈之间不可避免的会形成冰层,使得线圈-超导膜的实际距离 Z_1 比预定值大。如 7.2 所示,结果将会降低线圈系数(k 和 k'),如果使用未修正的 k' 计算,测得的 J_c 将会被高估。因此应特别注意保持测量环境尽可能干燥。如果测量系统置于开放的环境中,长时间测量后期测得的 J_c 值将比初期的测量值大,通常一小时后测得的值将会被高估 6%。如果测量系统是在几乎封闭的环境中且其湿度小于 5%,可以避免冰层影响。我们能够通过复现性测量加以校验。如果一段时间后测得相同的 J_c 值,就证明可以忽略冰层的影响。因为可以通过仔细的测量消除,在 7.3 和附录 D 中 D.1 评定实验线圈系数 k' 的不确定度时不考虑 a) 和 b) 这两个系统因素。

c) 简单 Bean 模型引起感应电场 E 的低估

如果穿透至超导膜下方的穿透磁场可以忽略不计,则通过式(4)计算的超导膜的平均感应电场 E_{avg} 已经足够精确。然而,确定实验电流阈值 I_{th} 时,即检测到 U_3 时,已有相当大的磁场穿透到超导膜下方。应当指出,在 $I_0 = I_{\text{th}}$ 时,快速穿透到超导膜下面的磁场会引起感应电场的显

著增加,这导致用式(4)计算的电场明显偏低^[26]。然而,一些实验结果显示,由此效应引起的相对标准不确定度通常小于5%。详细内容参见附录D中的D.2。

7.2 线圈-超导膜距离与预定值偏离的影响

因为线圈产生的磁场依赖于线圈-超导膜的距离 Z_1 ,线圈系数也依赖于 Z_1 。图9显示了通过式(1)和式(2)计算的理论线圈系数 k 与 Z_1 的曲线。经 k_0 归一化后的理论线圈系数 k 绘成 Z_1 的函数,其中 k_0 为 $Z_1=0.2$ mm时的理论线圈系数,线圈1、线圈2和线圈3的尺寸列于表1。当 $Z_1=(0.2\pm0.02)$ mm时,线圈1的 k 的相对偏差约2.6%。如果 Z_1 的偏差较小(例如 $\leq 20\%$),存在偏差的实验线圈系数 k' 与 k 成正比。支持上述讨论的实验结果在附录D中的D.3中描述。因此,如果距离的偏离可以估算,就可以使用图9估算系统误差对 k' 的影响。

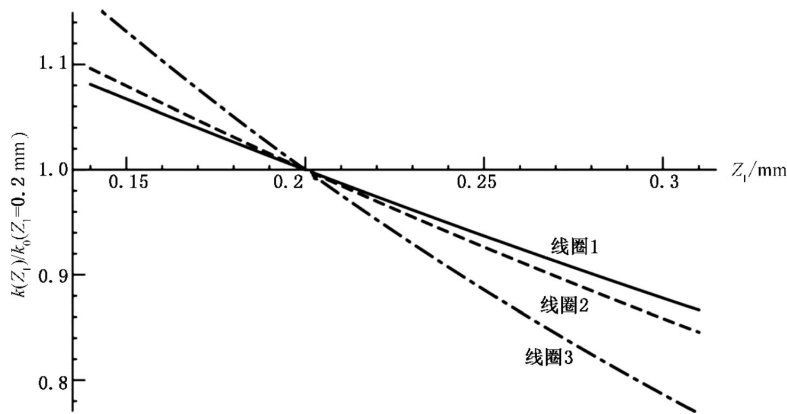


图9 线圈-超导膜间距 Z_1 与理论线圈系数 k 的曲线

7.3 实验线圈系数和 J_c 的不确定度

由于该测量方法通过标准试样(校准晶片)来确定实验线圈系数 k' ,而 k' 直接影响所测量的 J_c 值。因此 k' 的不确定度是影响测量不确定度的关键因素之一,而大面积校准晶片的不均匀性是这种不确定度的一个重要来源。在一个合适的电场下,实验线圈系数 k' 通过式 $k'=(J_{ct}/J_{c0})k$ 计算得到。这里 J_{ct} 为传输法测量获得的临界电流密度, $J_{c0}=kI_{th}/d$ 则通过感应法测得(6.2.5)。线圈1(表1)的系数 k' 的不确定度评定示例参见附录D中的D.1。其结果是 $k'=(J_{ct}/J_{c0})k=(2.587\ 8/3.443\ 7)\times 109.4=82.2\ \text{mm}^{-1}$, k' 的合成标准不确定度 $u_c(k')=2.4\ \text{mm}^{-1}$ (2.93%)。传输测量的 J_{ct} 的不确定度在合成标准不确定度中占主要部分。

在附录D中的D.2评定了由于使用简单的Bean模型[式(4)]所引起 E_{avg} 低估而产生的不确定度。对一个 $n=25$ 的典型样品,相对不确定度(B类)约为 $u_B=6.6/\sqrt{3}=3.8\%$ 。相对于B类不确定度,由于电场 U_3 测量的不确定度而产生的 J_c 的A类不确定度相当小,通常约为0.3%,如附录D中的D.4所示。 k' 的不确定度以及由于 E_{avg} 的低估引起的不确定度是 J_c 绝对值合成标准不确定度的主要来源。一个典型的 $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (DyBCO)超导膜的 J_c 绝对值的相对合成标准不确定度约为4.7%(参见附录D中的D.5),远低于10%的目标值。需要注意的是,使用同一线圈评定大面积超导膜的 J_c 的均匀性时, k' 的不确定度对 J_c 分布的相对合成标准不确定度没有影响,因此,相对合成标准不确定度将小于5%的目标值。

7.4 超导膜的边缘效应

图8显示,即使在线圈外部仍存在很大磁场,这将在超导膜中感应出屏蔽电流。因此,为了测量精

确,线圈必须远离超导膜的边缘。最初 Claassen 等人在文章中建议,为了避免边缘效应,线圈的外径应小于超导膜宽度的一半^[10]。然而,最近的有限元法数值计算表明,在 $Z_1=0.2$ mm 时,外径 5 mm 的线圈仍可正确测量宽度小至 6 mm 的超导膜^[27]。附录 D 中的 D.6 所述的实验结果表明,当线圈外围离超导膜边缘 0.3 mm 时,采用线圈 2 或 3(表 1)都可以获得精确的测量。考虑到线圈本身 0.1 mm~0.2 mm 的不确定度,当使用外径为 2 mm~5 mm 的线圈时,线圈的外围应离超导膜边缘超过 0.5 mm。

7.5 试样保护

湿气和水分有时与 YBCO 超导膜中的钡原子反应,导致超导性能恶化。如果 YBCO 超导膜测量后还需要使用,它们应在无湿气的环境(如真空或 He 气中)恢复到室温,以避免性能下降。也能对样品施加一些保护措施。用厚度小于几微米的有机涂层保护样品,既不影响测量结果,之后又能去除。

8 测试报告

8.1 测试样品的标识

如果可以,测试样品应按以下内容进行标识:

- a) 样品制造商的名称;
- b) 分类;
- c) 批号;
- d) 超导膜和基底的化学组分;
- e) 超导膜厚度和粗糙度;
- f) 超导膜制备工艺。

8.2 J_c 值的报告

报告 J_c 值应同时给出电场强度判据 E_c 。如果可能,幂指数 E - J 特性曲线的指数,即 n -值,也应一起报告。 n -值的测量有助于探查大面积 HTS 膜性能退化的区域。

8.3 测试条件报告

报告应包括以下的测试条件:

- a) 温度(大气压下或液氮压强下);
- b) 直流磁场(如果施加);
- c) 测试频率;
- d) 冰层的可能影响;
- e) 样品线圈规格;
- f) 隔离膜厚度。

附录 A

(资料性附录)

第 1 章~第 8 章的相关附加信息

A.1 测量大面积高温超导膜局域 J_c 的其他方法的评述

通过交流感应无损测量大面积超导膜局域 J_c 的方法有多种^[10-13,17],其中一些是探测三次谐波电压 $U_3 \cos(3\omega t + \theta)$ ^[10,11,17],另外一些则是测量基波电压^[12,13]。在这些感应测量方法中,通过向超导膜正上方的一个小线圈施加交流电流 $I_0 \cos \omega t$ 从而产生交变磁场,并根据磁场完全穿透超导膜时的线圈电流阈值 I_{th} ,计算得到 J_c ^[14]。当电流 $I_0 < I_{th}$,膜下方的磁场完全屏蔽,超导膜可被看作是经膜上表面反射的镜像线圈,携带方向相反、大小相同的电流。此时超导膜对电流 $I_0 \cos \omega t$ 的响应是线性的,线圈中没有产生感应的三次谐波电压。

对于 U_3 感应法,在 $I_0 = I_{th}$ 时 U_3 开始出现,此时超导屏蔽电流大小达到临界电流值,且其响应变成非线性^[17]。而对于其他仅使用基波电压的感应法,当感应电流大小达到临界电流值时,超导膜的完全屏蔽被破坏。穿透的交变磁场由安装在超导膜正下方的探测线圈检测,或是通过两个相邻线圈的互感变化检测。在所有这些感应测量 J_c 的方法中,共同点是在磁场完全穿透时,超导膜上表面的交变磁场为 $2H_0 \cos \omega t$ 。完全穿透的磁场幅值 $2H_0$ 等于 $J_c d$,由此可得 J_c ^[17]。超导体中感应的电场 E 可以用相同的式(4)计算^[14],使用第 6 章中所描述的类似的过程可实现精确测量。

另外一种磁感法使用的是霍尔探头阵列,其已经商用于测量涂层导体长带的局域 J_c ^[30,31]。这种方法是测量外加直流磁场情况下的磁场分布,通过计算获得相应的电流分布。这种方法还可以应用于宽度小于几个厘米的矩形大面积高温超导膜,与使用小线圈的交流感应方法相比具有更好的空间分辨率。

A.2 要求

因为三次谐波电压与测量频率成正比,所以为获得更好的信噪比 S/N 择优选择更高的频率。然而,由于测量设备(锁相放大器和/或滤波器)的频率范围限制,及测量大 $J_c d$ 膜时在样品线圈中感应的过大信号电压限制,建议对于 $J_c d$ 小的膜(≤ 1 kA/m),采用 1 kHz~20 kHz 的频率,对于 $J_c d$ 大的膜(≥ 20 kA/m)采用 0.2 kHz~8 kHz 的频率。要获得一个较大电场范围内的电流-电压特性需要测量较宽的频率范围。然而,对于一般 J_c 测量,同一量级的频率范围足够获得 n -值和准确的 J_c 值。

因为要冷却样品线圈产生的焦耳热,本标准的测量温度限定在液氮温度,即 1 013 hPa 压力下 77.35 K 和 200 hPa 压力下 65.80 K。当在气体环境中的不同温度下测量时,需要进一步研究。

U_3 感应法不仅适用于沉积在绝缘衬底(蓝宝石, MgO 等)上的大面积高温超导膜,也适用于金属基底上的涂层导体。然而,如果涂层导体有厚的金属保护层(银或铜)且厚度超过了 10 μm ,需要采取一些措施来避免趋肤效应。一项措施是将测量频率限制到足够低的程度(如约 8 kHz)。

A.2.1 三次谐波电压产生理论

这里,我们描述超导膜对置于其上方的载流线圈的响应^[17]。一片厚度为 d 且沿 xy 平面无限伸展的超导膜,位于 $-d < z < 0$,上表面在 $z=0$ 的 xy 平面,下表面在 $z=-d$ 。驱动线圈相对 z 轴轴对称,线圈位于圆柱坐标(r, θ, z)中的 $R_1 < r < R_2, Z_1 < z < Z_2$ 。线圈的匝数为 N ,载有正弦驱动电流 $I_d(t) = I_0 \cos \omega t$,沿着 θ 方向。在驱动线圈产生的磁场的作用下,超导膜中产生屏蔽电流。超导膜的面电流 K_θ (即电流密度在厚度 $-d < z < 0$ 内的积分)在响应中起关键作用,并且 $|K_\theta|$ 值不会超过膜的临界

值 $J_c d$ 。

超导膜的响应可以通过测量线圈中的感应电压 $U(t)$ 获得,通常 $U(t)$ 表示为傅里叶级数,基波电压 U_1 主要由线圈阻抗决定。偶次谐波(U_n 中 n 为偶数)一般远小于奇次谐波(即 U_n 中 n 为奇数)。三次谐波 U_3 是关键,因为 U_3 直接反映了超导膜的非线性响应(即 $J_c d$ 的信息)。

$$U(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

线圈产生轴对称磁场,在超导膜的上表面($z=0$)其径向分量 H_r ,可由下式得到:

$$H_r(r, t) = -H_0 \cos\omega t = -\left(\frac{I_0}{2}\right) F(r) \cos\omega t \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

线圈因子函数 $F(r)$ 由线圈的结构决定:

$$F(r) = \frac{N}{2\pi S} \int_{R_1}^{R_2} dr' \int_0^{2\pi} d\theta \int_{Z_1}^{Z_2} dz \frac{r' z \cos\theta}{(z^2 + r^2 + r'^2 - 2rr' \cos\theta)^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

其中 $S = (R_2 - R_1)(Z_2 - Z_1)$ 是线圈截面积。 $F(r)$ 一般在 $r = r_m$ [r_m 大致接近 $(R_1 + R_2)/2$] 有最大值 $F_m > 0, F(0) = F(\infty) = 0$ 。

当电流 $0 < I_0 < I_{th}$, 线圈产生的磁场不能穿透到超导膜下方($z < -d$)。在这种情况下,膜上方($z > 0$)的磁场分布可以简单通过镜像技术获得。镜像线圈产生的磁场(即超导膜中屏蔽电流产生的磁场)抵消了垂直分量 H_z ,并使径向分量 $2H_r$ 叠加为原来的两倍。因此,超导膜中的面电流 K_θ 可由式 $K_\theta(r, t) = 2H_r(r, t) = -I_0 F(r) \cos\omega t$ 得到。由于在 $0 < I_0 < I_{th}$ 区间超导膜的线性响应,线圈中感应电压没有谐波成分。

面电流密度的幅值 $|K_\theta| = 2|H_r| \leq I_0 F(r) \leq I_0 F_m$, 不能超过临界值 $J_c d$ 。当 $I_0 = I_{th}$, $|K_\theta| \leq I_0 F_m$ 达到 $J_c d$ 。电流阈值 I_{th} 通过下式获得

$$I_{th} = \frac{J_c d}{F_m} = \frac{J_c d}{k} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

其中 $k = F_m$ 为(理论)线圈系数。

当 $I_0 > I_{th}$, 磁场穿透到超导膜下方, K_θ 的非线性响应在线圈中产生谐波电压。

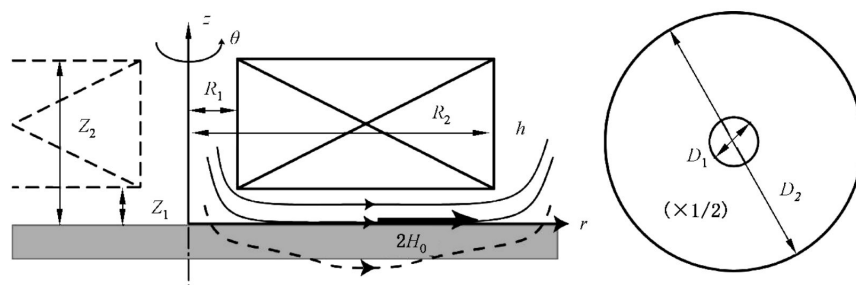


图 A.1 测量过程中样品线圈和磁场示意图

A.3 感应电场计算

这里,利用 Bean 模型^[14]估算在完全穿透临界态时($I_0 = I_{th}$)超导膜感应的平均电场 E 。假设一个半无限大的超导体($-d \leq z \leq 0$),位于 xy 平面以下($z \leq 0$),膜被认为是此超导体的一部分。当平行于 x 的方向的正弦磁场 $H_{x0} = 2H_0 \cos\omega t$ ($2H_0 = J_c d$)施加于超导体表面时,感应电场 E 只有 y 分量 $E_y(z)$,并且 $E_y = 0$ ($z \leq -d$),因为磁力线刚好到达膜的下表面($z = -d$)。通过从 $z = -d$ 到 z 积分 $-\mu_0(dH_x/dt)$,得到 $E_y(z) = -\mu_0 \omega d H_0 \sin\omega t (1 - \cos\omega t + 2z/d)$ 。随时间变化的膜表面处电场 $|E_y$

($z=0$)|, 峰值在 $\omega t = 2\pi/3$, 最大值为 $|E_y(0)| = (3\sqrt{3}/4)\mu_0\omega dH_0$ 。因为 $|E_y(z)|$ 的最大值在 $z=0$ (膜的上表面), 在 $z=-d$ (膜的下表面) 为零, 所以 $|E_y(z)|$ 的体积平均值可以估计为 $|E_y(0)|$ 最大值的一半,

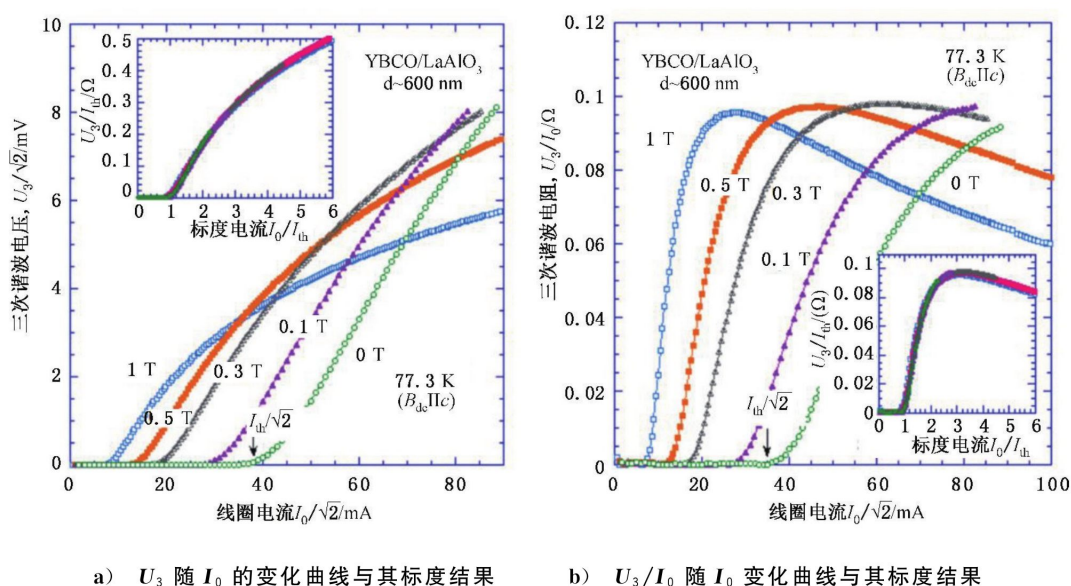
$$E_{\text{avg}} = \left(\frac{3\sqrt{3}\pi}{4} \right) \mu_0 f d H_0 \approx 2.04 \mu_0 f d^2 J_c = 2.04 \mu_0 k f d I_{\text{th}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.5})$$

对于典型测量参数, $f=1$ kHz, $d=250$ nm, $J_c=10^{10}$ A/m², E 计算值约为 2 μ V/m。

A.4 理论线圈系数 k 和实验线圈系数 k'

这里, 对 U_3 感应法中的理论线圈系数 $k=J_c d/I_{\text{th}}$ 和实验线圈系数 k' 的基本概念加以说明。当线圈电流 I_0 等于所述电流阈值 I_{th} 时, 线圈下方最大磁场值 $2H_{0,\text{max}}=J_c d$, 且磁场刚好完全穿透超导膜。由于 $2H_{0,\text{max}}$ 可理论上计算, 我们可以计算理论线圈系数 $k=J_c d/I_{\text{th}}$ 。然而, 上述“真实的 I_{th} ”对应的 U_3 无穷小。因为无法检测无穷小的 U_3 , 得到“真实的 I_{th} ”, 我们需要一种替代方法, 以获得一个“实验的 I_{th} ”和相应的实验线圈系数 k' 。

A.5 U_3-I_0 标度曲线和确定 I_{th} 的恒电感判据



a) U_3 随 I_0 的变化曲线与其标度结果 b) U_3/I_0 随 I_0 变化曲线与其标度结果

图 A.2 外加直流磁场下 YBCO 超导膜 a) U_3 和 b) U_3/I_0 随 I_0 变化曲线
(插图为经 I_{th} 归一化后的标度结果)

为方便起见, (实验) 电流阈值 I_{th} 常常由一个恒电压判据来确定, 例如 $U_3/\sqrt{2}=50$ μ V。然而, 使用恒电压判据是有问题的。对 I_0 与 U_3 的关系的理论分析表明, 存在清晰的标度行为 $U_3/I_{\text{th}}=\omega G(I_0/I_{\text{th}})$, 其中 G 是仅由样品线圈规格所确定的标度函数^[11,17]。这个公式意味着如果 U_3 和 I_0 都使用 I_{th} 归一化, 对于不同的 I_{th} 值, U_3 随 I_0 的变化曲线应重叠到一条曲线。图 A.2 a) 的插图清楚地表明这一标度行为。因为三次谐波电阻 $U_3/I_0=\omega G(I_0/I_{\text{th}})/(I_0/I_{\text{th}})$, U_3/I_0 本身相当于已经归一化[图 A.2 b)], 它与归一化后的电流 I_0/I_{th} 也存在标度行为[图 A.2 b) 的插图]。由于三次谐波电压 U_3 与 I_{th} 成正比, 通过一个恒电压判据确定 I_{th} 本身会引起系统误差; 即与标准样品相比, $J_c d$ 大(小)的样品, J_c 将被低估(高估)^[16]。三次谐波电阻 U_3/I_0 [图 A.2 b)] 的标度行为表明 I_{th} 应该通过恒电阻判据来确定, 例如

$U_3/I_0=2\text{ m}\Omega$ 。另外,由于 U_3 值与测量频率成正比,所以在多个频率^[16,30]下测量 U_3 应该使用恒电感判据来确定,例如 $U_3/fI_0=2\text{ }\mu\Omega\cdot\text{s}$ 。同时要注意的是,这种标度行为是 $J_c d$ 测量的基础,在 6.2~6.4 中描述了标准样品(校准晶片) $J_c d$ 测量的过程。

A.6 可逆磁通运动的影响

临界态模型经常用于描述超导体的大部分电磁特性。然而,在临界态模型中,磁通运动被假设为完全不可逆的。因此,如果磁通线的位移限定在钉扎势阱,磁通运动包括可逆运动,则基于临界态模型的预测结果将不甚理想。例如,极细丝多芯铌钛复合线的单位体积交流损耗能量密度随丝径的减小而急剧下降,偏离临界态模型的预测^[31]。超导体交流磁化率的虚部也比临界态模型预测的要小^[32]。对于当前测量,据报道,在较高磁场时临界电流密度被高估^[33]。本条将描述可逆磁通运动的影响。

当超导膜的厚度等于或者小于 Cambell 交流穿透深度:

$$\lambda'_0 = \left(\frac{Ba_f}{2\pi\mu_0 J_c} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (\text{A.6})$$

可逆磁通运动变得显著, a_f 是类磁通间距。因此,在高场和/或高温条件下, J_c 减小并观察到可逆磁通运动的影响。在当前测量中,由样品线圈产生的磁场处于非常低的水平。在 $J_c=10^{10}\text{ A/m}^2$, $B=0.01\text{ T}$ 时, λ'_0 估计为 140 nm ,远小于超导膜典型的厚度 300 nm 。然而,当 $J_c=10^9\text{ A/m}^2$ 时, λ'_0 为 440 nm ,意味着超导膜的厚度必须超过 880 nm 。因此,最好是根据 J_c 估计 λ'_0 ,确认当前测量中可逆磁通运动不显著,即满足 $\lambda'_0 < d$ 。这种估计 λ'_0 也适用于直流磁场垂直施加于膜表面的情况,这时交变和直流磁场的方向不同, λ'_0 根据直流磁场估算^[34]。

附录 B

(资料性附录)

可选的测量系统

B.1 总则

如 5.1 所述,为准确测量 U_3 ,有必要采用一个合适的系统来降低信号发生器和功率放大器产生的谐波噪声电压。在 5.1(图 1)中所提出的标准方法是,加一个规格与样品线圈相同的抵消线圈,放置在一片大 $J_c d$ 超导膜上,用于补偿谐波噪声电压。虽然使用带有大 $J_c d$ 膜的抵消线圈是补偿谐波噪声电压最推荐的方法,但使用无超导膜的抵消线圈也可以有效减低 U_3 的噪声^[35]。由于来自电源的 U_3 噪声与样品线圈阻抗成正比,当线圈电感小于电阻时,这种方法很有效。例如,在一个典型的线圈中,如 6.5 (表 1)中的线圈 1,在 77.3 K 时的电阻与 $3f=3$ kHz 时的电抗相似。由于超导屏蔽电流导致的自感降低约为 1/3;这种情况下, U_3 的噪声将减少至 20% 以下。因为电流阈值 I_{th} 应该使用恒电感判据, $2\pi L_c = U_3/fI_0 = \text{常量}$ (见 6.2.3 和 6.4),如果谐波噪声电压与频率弱相关,则低频时 U_3 噪声的影响更严重。因此,使用无大 $J_c d$ 超导膜的噪声抵消方法可以作为一种简单方法。一些谐波噪声抵消的例子参见 B.2。

另外一种补偿谐波噪声电压的技术是使用可变电阻和可变电感线圈模拟样品线圈的自感和电阻,如图 B.1 所示^[18,19]。一对同轴相互靠近放置的线圈 L_{va} 和 L_{vb} ,它们的电感调整至与 L_d 相等。电感和电阻 R_{va} 、 R_{vb} 与样品线圈串联,抵消电路的阻抗 Z_a 和 Z_b 调整到与样品线圈的阻抗 Z_d 相等。

第三种降噪方法是采用两个线圈,驱动线圈和绕在其外部的另一个探测线圈,如图 B.2 所示。驱动线圈产生交变磁场,测量探测线圈中产生的三次谐波电压。由于探测线圈中无电流流动,来自电阻的 U_3 噪声可以消除。这种方法对于电阻超过电感的小的驱动线圈是有效的。相比于采用抵消线圈的方法,其主要优点是电路简单。

B.2 电源产生的谐波噪声和降噪

图 B.3 给出了当交流电流通过一个 $10\ \Omega$ 的珐琅电阻时,信号发生器和功率放大器(NF:1930A 和 NF:HSA4011)中产生谐波噪声电压的例子($f:0.2\ \text{kHz}\sim 20\ \text{kHz}$)。可以看出,当电流小于 80 mA,该噪声与频率无关,因为三次谐波电压正比于频率,意味着在较低频率下噪声对测量的影响更为严重。图 B.4 显示了图 1 中电路(抵消线圈带有超导膜)在 U_3 测量中的降噪效果。信号“A”是没有使用抵消线圈(即 B 接地短路)时的测量结果。信号“A”的幅值最初由于噪声而增加,与信号“B”相等。由于来源于非线性超导响应的三次谐波电压,其值随后略微降低,然后快速增加。 U_3 的略微降低是由于超导电流信号和噪声信号之间的相位差^[17]。可以看到,通过测量图 1 中“A-2B”信号,噪声被有效消除。

将一个大 $J_c d$ 超导膜放置在线圈下方,模拟超导电流不产生的任何 U_3 信号的情形,在没有任何降噪系统情况下测量表 1 中线圈 1 的谐波噪声电压。电流阈值 I_{th} 是通过恒电感判据确定的,例如 $U_3/fI_0 = 2\ \mu\Omega \cdot s$,因此噪声电压以 U_3/fI_0 的归一化形式出现(图 B.5)。可以发现由于严重的系统噪声,采用这么小的判据 $2\pi L_c = U_3/fI_0 = 2\ \mu\Omega \cdot s$ 是不可行的。使用带有超导膜的抵消线圈可有效降低此类大噪声电压,因而可以使用 $U_3/fI_0 = 2\ \mu\Omega \cdot s$ 的判据(图 B.6),即使当 $I_0/\sqrt{2} = 160\ \text{mA}$ (对应于 $J_c d = 18.6\ \text{kA/m}$),系统的噪声仍小于 $0.05\ \mu\Omega \cdot s$ 。如 B.1 中所述,使用无超导膜的抵消线圈也可以用来降噪。图 B.7 给出了线圈 1 经归一化后的噪声电压。系统在 10 kHz 或更低频时的噪声水平约为 $0.1\ \mu\Omega \cdot s$,这是推荐判据 $2\ \mu\Omega \cdot s$ 的 5% 左右。对双线圈测量系统(图 B.2)的典型噪声电压也进行了

测量,如图 B.8。这些数据获取均采取内部驱动线圈($D_1=1.0\text{ mm}, D_2=2.8\text{ mm}, H=1.0\text{ mm}, 200\text{ 匝}$)和外部拾取线圈($D_1=3.0\text{ mm}, D_2=6.0\text{ mm}, H=1.0\text{ mm}, 295\text{ 匝}$)。该系统在 10 kHz 或更低频时的噪声水平为约 $0.05\text{ }\mu\Omega\cdot\text{s}$,这是 $1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{s}$ 判据的 5% 左右。

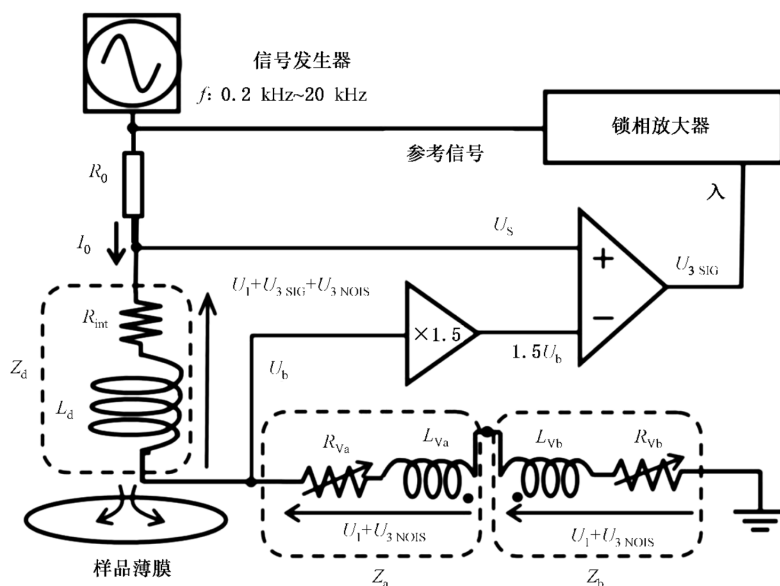


图 B.1 可变电阻电感的抵消电路示意图

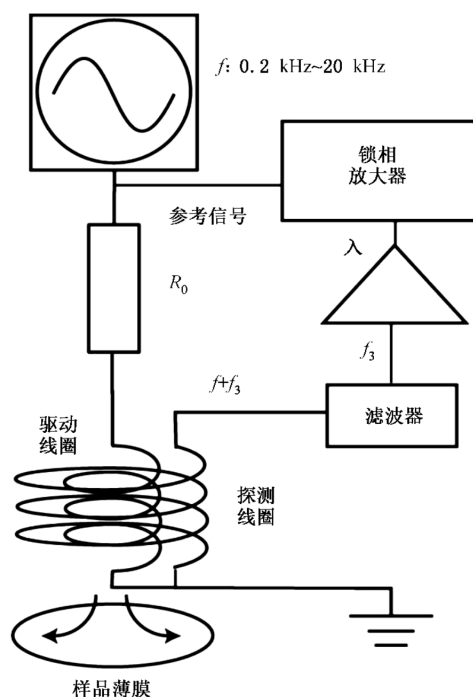


图 B.2 双线圈法的电路示意图

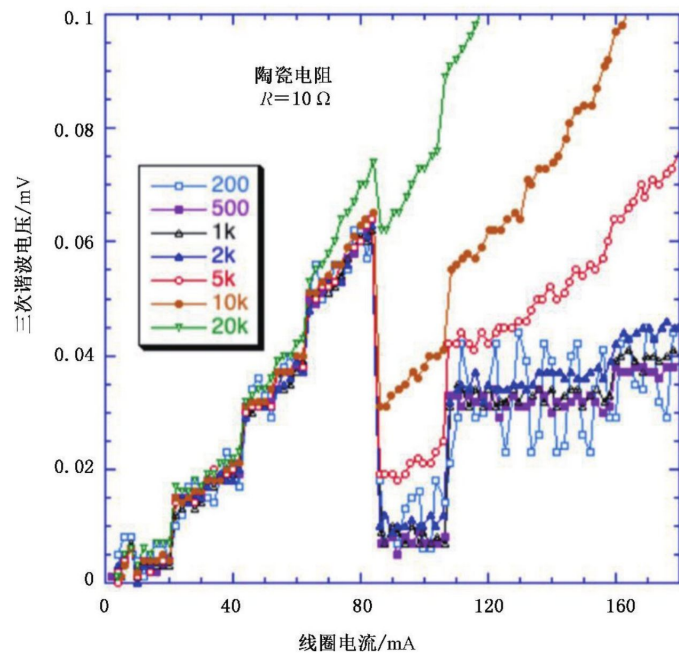


图 B.3 源于电源的谐波噪声

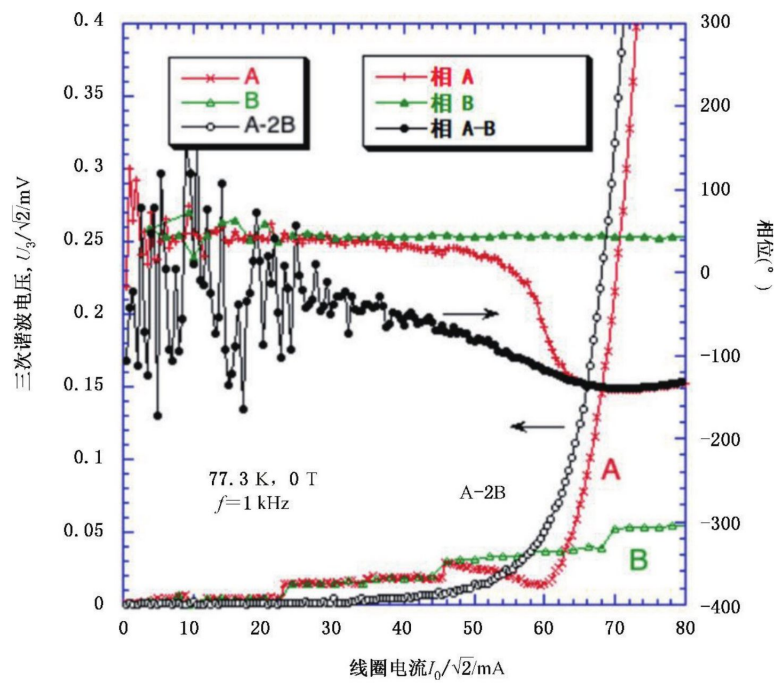


图 B.4 有超导膜和抵消线圈的降噪效果

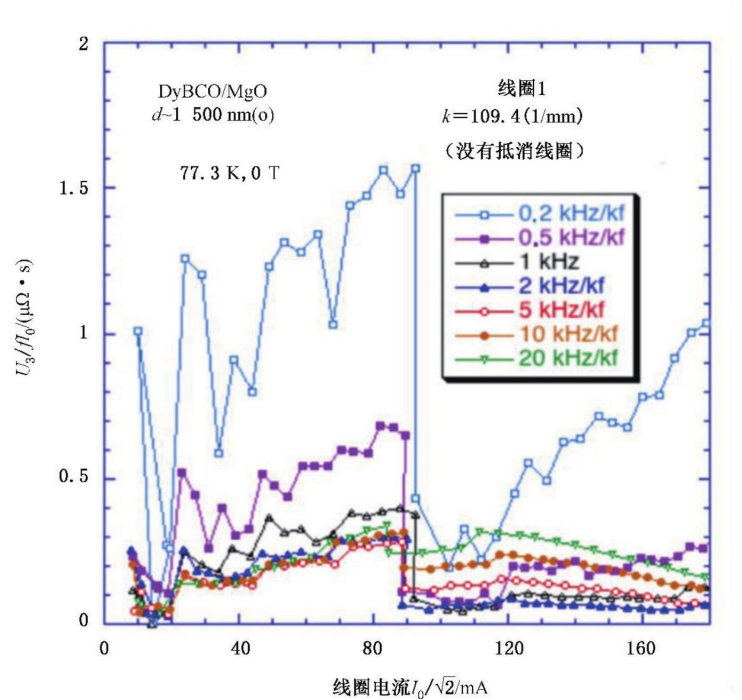


图 B.5 源于电源的归一化谐波噪声电压(U_3/fI_0)

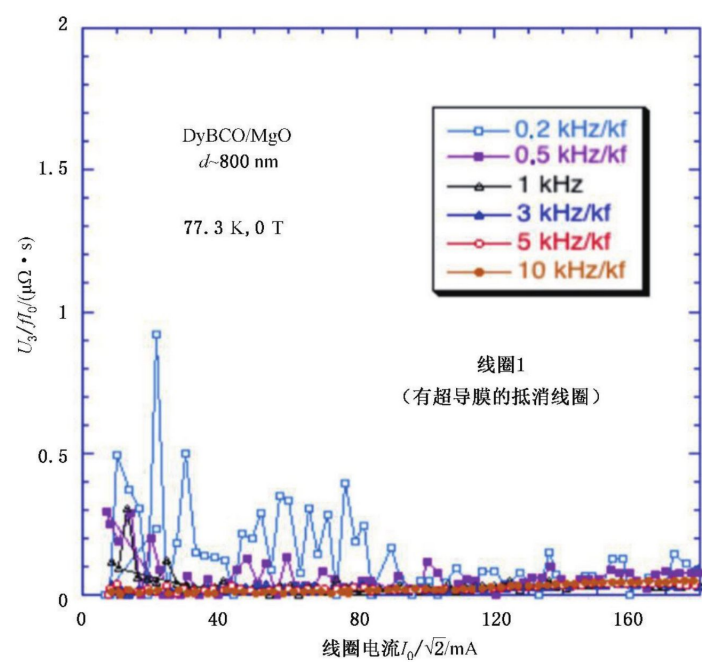


图 B.6 带有超导膜的抵消线圈降噪后的归一化噪声电压

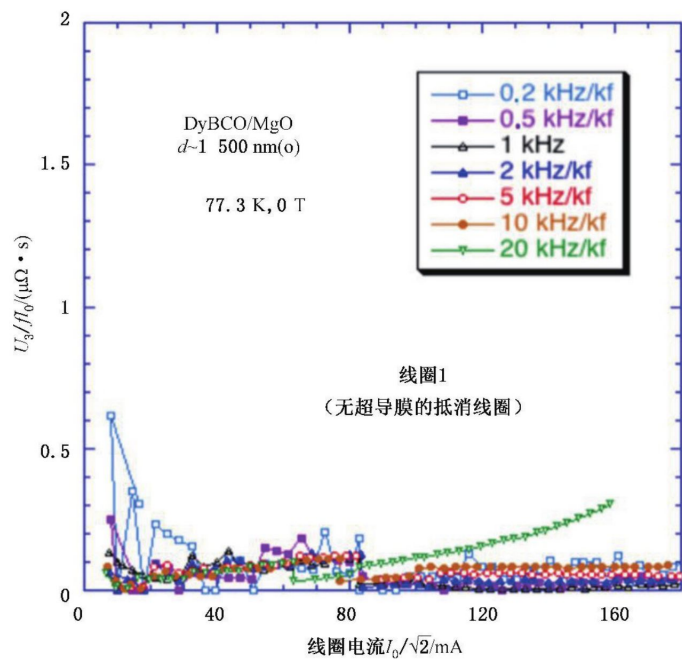


图 B.7 无超导膜的抵消线圈降噪后的归一化噪声电压

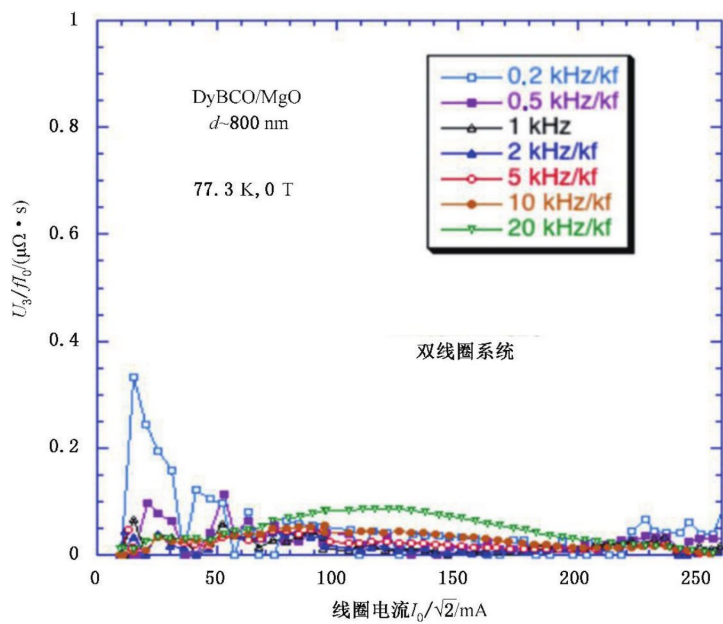


图 B.8 双线圈系统(图 B.2 中)降噪后的归一化噪声电压

附 录 C

(资料性附录)

不确定度考虑

C.1 总则

1995年,包括国际电工技术委员会(IEC)在内的多个国际标准组织决定在他们的标准中统一规范使用统计术语,将“不确定度”用于所有定量(与数值有关)的统计表示,取消用“精密度”和“准确度”的定量表示。“精密度”和“准确度”仍然可以定性使用。统计术语和不确定度评定方法的标准参见文献^[36]。

IEC 现有标准和未来标准的制修订中是否采用不确定度表示方法,由 IEC 各技术委员会(TC)决定。这项更改工作推行起来并不容易,尤其对那些不熟悉统计学以及不确定度术语的用户来说,这种更改可能会带来困惑。2006年6月,超导技术委员会(TC 90)在日本京都召开的会议上决定在标准的制修订中采用不确定度表示方法。

将“精密度”和“准确度”转换成“不确定度”要求对数值的来源有所了解。扩展不确定度的包含因子可能是1,2,3或者其他数字。厂商说明书给出的数据一般可视为均匀分布,会导致一个的转化系数。在将原数值转换成相应的标准不确定度时,应选用适当的包含因子。这里对转换过程进行详细解释,旨在告知用户在这个过程中相关的数值之间是如何转换的,并非要求用户都照此处理。转换成不确定度术语的过程不影响用户评定其测量的不确定度是否符合本标准。

基于召集人的工程判断和误差传递分析,TC 90 测量标准中给出的规范是为了限制任何影响测量的量的不确定度。如有可能,标准对某些量的影响做简单限制,因此不要求用户评定这些量的不确定度。标准的总不确定度由实验室间比对来确认。

C.2 定义

统计学定义出自参考文献^[36—38]。要注意的是,并非本标准提到的所有术语都在参考文献^[36]中有明确定义。例如,参考文献^[36]中使用的“相对标准不确定度”和“相对合成标准不确定度”(参考文献^[36]的5.1.6和附录J)并没有正式定义^[38]。

C.3 不确定度概念的考虑

统计学评定过去频繁使用的变化系数(COV)是标准偏差和均值的比(变化系数 COV 通常称为相对标准偏差)。这样的评估已经用于测量精密度的评定,并给出重复试验的接近度。标准不确定度(SU)与变化系数 COV 相比,更取决于重复试验的次数,而不是平均值。因此,标准不确定度在某种程度上能看出更真实的数据分散和试验评判。下面的例子给出一组两个标称一致的引伸计使用相同信号调节器和数据采集系统进行的电子漂移和蠕变电压的测量结果。从 32 000 个单元的电子表格中随机抽取 $n=10$ 组数据,见表 C.1。这里,1 号引伸计 E_1 在零偏移位置时,2 号引伸计 E_2 偏移 1 mm。输出信号单位为 V。两个引伸计输出信号的标准不确定度和变化系数(COV)计算过程见表 C.2~表 C.5,及式(C.1)~式(C.4)。

表 C.1 由两个标称一致引伸计的输出信号

输出信号/V	
E_1	E_2
0.001 220 70	2.334 594 73
0.000 610 35	2.334 289 55
0.001 525 88	2.334 289 55
0.001 220 70	2.334 594 73
0.001 525 88	2.334 594 73
0.001 220 70	2.333 984 38
0.001 525 88	2.334 289 55
0.000 915 53	2.334 289 55
0.000 915 53	2.334 594 73
0.001 220 70	2.334 594 73

表 C.2 两组输出信号的平均值

均值 \bar{X} /V	
E_1	E_2
0.001 190 19	2.334 411 62

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} [\text{V}] \quad \dots\dots\dots (\text{C.1})$$

表 C.3 两组输出信号的实验标准偏差

实验标准偏差 s /V	
E_1	E_2
0.000 303 48	0.000 213 381

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} [\text{V}] \quad \dots\dots\dots (\text{C.2})$$

表 C.4 两组输出信号的标准不确定度

标准不确定度 u /V	
E_1	E_2
0.000 095 97	0.000 067 48

$$u = \frac{s}{\sqrt{N}} [V] \dots\dots\dots (C.3)$$

表 C.5 两组信号的变异系数

变化系数 COV/%	
E_1	E_2
25.498 2	0.009 1

$$COV = \frac{s}{X} \dots\dots\dots (C.4)$$

两个引伸计偏差的标准不确定度非常相近,而两组数据的变化系数 COV 相差将近 2 800 倍。这显示了使用标准不确定度的优势:不确定度不依赖于平均值。

C.4 TC90 标准的不确定度评估范例

测量的观测值通常不能精确地与被测物理量的真实值相符。观测值被当作是对真实值的一种估测。测量的不确定度是测量误差的组成部分并且是任何测量都存在的固有性质。因此,结果的不确定度表示的是对测量程序逐步认知的计量学量。所有物理测量的结果都包含两个部分:估算值和不确定度。GUM 是测量过程的一个简明的、标准化的指南文件。用户可以尝试用一个最佳估算值加上不确定度来表述真实值。如 A 类不确定度评定(在同一实验条件下反复测量,呈高斯分布)和 B 类不确定度评定(利用以往的实验结果,文献的数据,厂商说明等等,呈均匀分布)。

下面举例说明用 GUM 进行不确定度分析的过程:

- a) 首先,用户应推导出一个数学测量模型,即将被测量表示成所有输入量的函数。举个简单例子,拉力实验中载荷传感器测量拉力 F_{LC} 的不确定度:

拉力 F_{LC} (作为被测物理量) = W (预期的标重) + d_w (厂商的数据) + d_R (反复测量标重/天) + d_{Re} (不同日期测量的可再现性)

这里,输入量有:不同天平称量的标重(A 类),厂商的数据(B 类),用数字电子系统反复测量的结果(B 类),不同日期测量最终数值的可再现性(B 类)。

- b) 用户应给每个输入值指定一个分布方式(如:A 类测量用高斯分布,B 类测量用均匀分布)。
c) A 类测量标准不确定度评定:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

s —— 实验标准偏差;
 N —— 测量数据点总数。

- d) B 类测量标准不确定度评定:

$$u_B = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot d_w^2 + \dots\dots\dots} \dots\dots\dots (C.6)$$

式中:

d_w —— 均匀分布数值的范围。

- e) 用下式计算各种标准不确定度的合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \dots\dots\dots (C.7)$$

在这种情况下,假定各输入量之间没有关联。如果说公式包含乘积项或商项,合成标准不确定度则使用偏导数评定,由于灵敏系数的存在,其间关系就变得纷繁复杂^[39,40]。

- f) 可作为选择——涉及的被测量的合成标准不确定度的评定可以乘以一个包含因子(如,1 对应于 68%;2 对应于 95%;3 对应于 99%),以提高被测量落于期望区间的概率。
- g) 报告结果表示成被测量的估计值加减扩展不确定度且附上测量单位。至少,还得说明计算的扩展不确定度使用的包含因子和估算结果的覆盖率。

为方便计算和标准化程序,使用合适的经认证的商业软件是降低常规工作量的直接方法^[41,42]。尤其,当使用这样一类软件工具时,指定的偏导数可以很容易的获得。更多关于测量不确定度的文献参见[38,43,44]。

附录 D
(资料性附录)
不确定度的评定

D.1 实验线圈系数不确定度的评定

利用 $k' = (J_{ct}/J_{c0})k$ 计算实验线圈系数 k' , 这里 J_{ct} 是通过传输法测得的临界电流密度, $J_{c0} = kI_{th}/d$ 是通过感应法测得的临界电流密度, 这两者均是在适当的电场强度判据下确定的(6.2.5)。以下给出 $E_c = 200 \mu\text{V/m}$ 的判据下 J_{ct} 和 J_{c0} 的典型实验数据, 这些数据可用来确定表 1 中线圈 1 的 k' 值。

5 个桥的 $J_{ct}(10^{10} \text{ A/m}^2)$: 2.578, 2.622, 2.561, 2.566, 2.612。

其平均值 $\bar{X} = 2.5878$, 实验标准偏差 $s = 0.02759$, 标准不确定度 $u_A = s/\sqrt{N} = 0.012339$, 变异系数 $\text{COV} = s/\bar{X} = 0.0107(1.07\%)$

8 个点的 $J_{c0}(10^{10} \text{ A/m}^2)$: 3.4567, 3.4327, 3.4127, 3.4514, 3.4474, 3.4581, 3.4487, 3.4421。

其平均值 $\bar{X} = 3.4437$, $s = 0.014915$, $u_A = s/\sqrt{N} = 0.0052731$, $\text{COV} = s/\bar{X} = 0.00433(0.433\%)$

上述 J_{ct} 和 J_{c0} 的标准不确定度(A类测量)是由 YBCO 超导膜临界电流密度的变化引起的。 J_{ct} 的标准偏差及其对 $u_c(k')$ 的贡献超过 J_{c0} 的标准偏差及其对 $u_c(k')$ 的贡献, 这可能因为, 与感应法的直径约 3.9 mm 的测量区域相比, 微桥的面积很小($20 \mu\text{m} \times 1 \text{ mm} \sim 70 \mu\text{m} \times 1 \text{ mm}$), 所以不同微桥测得的 J_c 的变化更大^[15]。在使用 RL 抵消电路的测量中获得了相似的变异系数值 $J_{ct}(1.82\%)$ 和 $J_{c0}(0.346\%)$ (图 B.1)^[19]。还有其他因素引起 J_{ct} 的不确定度, 比如桥宽度的不确定度、传输测量的不确定度等。由这些多方面原因引起的不确定度在这里被归入 B 类不确定度, 银包套的 Bi-2212 和 Bi-2223 氧化物超导体的传输临界电流测量的 $\text{COV} = 5\%$ ^[45], 据此可以计算 B 类不确定度。于是 $u_B = 2.5878 \times 0.05\sqrt{3} = 0.07470(10^{10} \text{ A/m}^2)$ 。从这些数据我们可以绘制出以下不确定度的分配表(表 D.1), 并且我们得到了最终结果: $k' = (J_{ct}/J_{c0})k = (2.5878/3.4437) \times 109.4 = 82.2 \text{ mm}^{-1} \pm 2.4 \text{ mm}^{-1}$ 。可见 J_{ct} 的 B 类不确定度主导了合成标准不确定度。为了更好地理解分配表, $u_c(k')$ 的公式如下:

$$u_c(k') = [(k/J_{c0})^2 u_A(J_{ct})^2 + (k/J_{c0})^2 u_B(J_{ct})^2 + (-kJ_{ct}/J_{c0}^2)^2 u_A(J_{c0})^2]^{1/2}$$

..... (D.1)

表 D.1 实验线圈系数 k' 的不确定度分配表

因素	标准不确定度 $u(X_i)$ (10^{10} A/m^2)	类型	灵敏度系数 c_i	对 $u_c(k')$ 的贡献, $ c_i u(X_i)$
J_{ct}	0.012339	A 类	$31.77 \text{ mm}^{-1}/(10^{10} \text{ A/m}^2)$	0.392 mm^{-1}
J_{ct}	0.07470	B 类	$31.77 \text{ mm}^{-1}/(10^{10} \text{ A/m}^2)$	2.373 mm^{-1}
J_{c0}	0.0052731	A 类	$-23.87 \text{ mm}^{-1}/(10^{10} \text{ A/m}^2)$	0.126 mm^{-1}
合成标准不确定度 $u_c(k') = (\sum \{c_i u(X_i)\}^2)^{1/2}$				2.409 mm^{-1}

D.2 感应电场计算的不确定度

在此方法中, 完全穿透时超导膜中感应出的平均电场是使用 Bean 模型[6.2.4 中式(4)]来估算的。

尽管式(4)假设由线圈产生的磁场刚好到达超导膜的下表面[即 $I_0 = I_{th}$ (理论)],但通过 U_3 测量获得的实验 I_{th} 要比理论 I_{th} 大 1.3 倍以上。当 $I_0 = I_{th}$ (理论)时,磁场穿透到所述超导膜的下面,此时感应电场可能会超过式(4)中得到的理论值。在参考文献[26]中提出了 $I_0 > I_{th}$ 时一个大的电场的可能性:为简便起见,针对超导膜对线电流的响应进行了分析研究。当线电流在超导膜上方的直导线中流动时,电流阈值由 $I_{th} = \pi J_c d y_0$ 获得,这里 y_0 为金属导线与超导膜间的距离。当 $d/y_0 \ll I_0/I_{th} - 1 \ll 1$ 时,在超导膜中感应出的电场 E_{line} 的大小粗略估计如下^[26]:

$$E_{line} \approx \sqrt{2} \mu_0 f I_{th} (I_0/I_{th} - 1) \approx 4.44 \mu_0 f J_c d y_0 (I_0/I_{th} - 1) \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式(D.2)与式(4)的比值约为:

$$E_{line}/E_{avg} \approx 2.18 (y_0/d) (I_0/I_{th} - 1) \approx 170 \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

在这里我们采用 $y_0 = Z_1 = 0.2 \text{ mm}$, $d = 250 \text{ nm}$, 和 $I_0/I_{th} = 1.1$ 。出现这么大的 E_{line} (E_{avg} 的 170 倍),是因为 $I_0 > I_{th}$ 时的电场源自垂直于超导膜表面的磁通渗透。注意,参考文献[26]中线电流的模型太简单,不能模拟真实的线圈电流。

尽管上述线电流理论预计的感应电场几乎比使用 Bean 模型简单计算式(4)得到的感应电场大两个数量级,但一些实验结果表明式(4)引起的低估不应当这么大。对于 YBCO 样品的 E - J 特性,众所周知宽范围 $\log_{10}(E)$ 相对 $\log_{10}(J)$ 曲线有轻微向下弯曲。这是一种涡旋-玻璃相的特征,磁通涡旋的势垒 $U(J) \propto J^{-\mu}$ 依赖于 J , 在 $J \rightarrow 0$ 时发散,此时对应的电阻真正变为零^[46]。这种向下弯曲在图 5 中可以清楚地观察到,并且对较低(高) E 的范围计算的 n -值增加(减小)。从使用式(4)进行的频率相关的测量,可获得合理的 YBCO 超导膜 E - J 特性以及 n -值,与传输法和磁测法得到的宽范围 E - J 特性吻合较好^[16,47]。磁场的垂直分量很可能被超导膜中诱导出的平行电流抵消掉,所以实际上感应电场不会这么大。若用来确定 I_{th} 的电感判据足够小,如表 1 所示,式(4)对 E_{avg} 的低估至多 5 倍。从幂指数定律 E - J 特性 $E = E_c \times (J/J_c)^n$, 得到:

$$J = J_c \times (E/E_c)^{1/n} \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

其中的 E_c 是用来定义 J_c 的电场强度判据。需要注意的是当 $E = E_c$ 时 $J = J_c$ 。当通过判据 $E_{avg} = E_c$ 来确定 J_c 时,如果式(4)对 E_{avg} 低估了 5 倍,实际的 E_c 值应为 $5E_c$ 。由此导致了 J_c 的偏差 $\Delta J_c = J_c \times (5^{1/n} - 1)$ 。因而计算所得的相对偏差 $(\Delta J_c/J_c)$ 为 5.5% ($n=30$), 6.6% ($n=25$), 和 8.4% ($n=20$)。相对标准不确定度(B 类,以 % 表示)如下式:

$$u_B(E_{avg}) = 100(5^{1/n} - 1)/\sqrt{3} \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

对于 $n=25$ 的典型样品, $u_B(E_{avg}) = 6.6/\sqrt{3} = 3.8\%$, 对于其他 n -值的样品, $u_B = 3.2\%$ ($n=30$), 4.8% ($n=20$), 和 6.5% ($n=15$)。

D.3 关于线圈-膜距离偏离的影响的实验结果

在 7.2 中提到,如果线圈与超导膜间距 Z_1 偏离规定值但偏差小(比如 $\leq 20\%$)时,有偏差的实验线圈系数 k' 与 k 成正比。一些实验结果支持基于 k 的变化来估算 k' (图 9)。当用表 1 中线圈 2 测 J_c 时,采用有偏差的 $Z'_1 = 0.175 \text{ mm}$ 和未变的 k' 值得到的 J_c , 是使用准确的 $Z_1 = 0.2 \text{ mm}$ 得到的 J_c 的 94.5% 。图 9 预计的实验线圈系数 $k'(Z'_1 = 0.175 \text{ mm}) = 1.063k'(Z_1 = 0.2 \text{ mm})$, 实验结果与理论预计吻合很好。采用有很大偏差的 $Z'_1 = 0.3 \text{ mm}$ 的类似实验得到了 1.34 倍大的 J_c , 比图 9 预计的 $1/0.786 = 1.27$ 稍大。这是由于即使磁场相同,三次谐波信号也会随 Z_1 而减小。当 ΔZ_1 足够小时,这个效应可以忽略,这可从 U_3 与 I_0 的非线性关系得到理解(图 6)。

D.4 J_c 和 n -值 A 类不确定度示例,起源于 U_3 测量的实验不确定度

如上述各条中提到的,在评定 J_c 的不确定度时,B 类不确定度,即 k' 的不确定度和源于低估的 E 的不确定度通常较大,一般大于 2%。与此相反,起源于 U_3 测量的 J_c 的 A 类不确定度要小得多。以下例子为 250 nm 厚的 DyBCO 超导膜在同样的条件下,通过 I_{th} (实验)的频率依赖关系得到的 J_c 和 n 值的重复测量结果(表 D.2)。统计数据如下:

- a) $J_c(10^{10} \text{ A/m}^2)$: 平均值 $\bar{X} = 1.896$, $s = 0.006\ 254$, $u_A = s/\sqrt{N} = 0.001\ 978$, $COV = s/\bar{X} = 0.003\ 299(0.33\%)$ 并且相对标准不确定度为 $u_A/\bar{X} = 0.001\ 043(0.10\%)$;
 n : 平均值 $\bar{X} = 23.67$, $s = 0.577\ 1$, $u_A = s/\sqrt{N} = 0.182\ 5$, $COV = s/\bar{X} = 0.024\ 38(2.44\%)$ 并且相对标准不确定度为 $u_A/\bar{X} = 0.007\ 710(0.77\%)$ 。
- b) $J_c(10^{10} \text{ A/m}^2)$: 平均值 $\bar{X} = 1.904$, $s = 0.004\ 498$, $u_A = s/\sqrt{N} = 0.001\ 422$, $COV = s/\bar{X} = 0.002\ 362(0.24\%)$ 并且相对标准不确定度为 $u_A/\bar{X} = 0.000\ 746\ 8(0.075\%)$;
 n : 平均值 $\bar{X} = 20.40$, $s = 0.419\ 4$, $u_A = s/\sqrt{N} = 0.132\ 6$, $COV = s/\bar{X} = 0.020\ 56(2.06\%)$ 并且相对标准不确定度为 $u_A/\bar{X} = 0.006\ 500(0.65\%)$ 。

这些结果表明 n -值的相对标准不确定度(A 类)小于 1%,并且 J_c 的 A 类不确定度更小,不大于 0.1%。即使只做一次测量,A 类不确定度也是小的:对 n 约为 2%,对 J_c 约为 0.3%。如图 6 所示,具有幂指数定律 E - J 特性的超导膜中 U_3 与 I_0 的关系曲线的偏移已被理论预测,该偏移除了 n 以外不依赖于任何其他参数^[48],因而 n -值的 A 类不确定度直接成为 n 的不确定度。注意到在高频即更高电场强度 E 范围测得的 n -值变小,反映了如图 5 中所见的幂指数定律 E - J 特性曲线的轻微向下弯曲,这已经在 D.2 中进行了解释。然而由于两种情况下都是相同判据 $E_c = 100 \mu\text{V/m}$ 定义的,得到的 J_c 值也相同为 $1.90 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ 。

表 D.2 J_c 和 n -值的重复测量示例

测量序号	a) 在 0.5 kHz、2 kHz、10 kHz 下测量		b) 在 2 kHz、8 kHz、35 kHz 下测量	
	$J_c(10^{10} \text{ A/m}^2)$	n	$J_c(10^{10} \text{ A/m}^2)$	n
1	1.901	23.51	1.912	19.61
2	1.902	23.35	1.907	20.30
3	1.900	23.53	1.909	20.00
4	1.903	22.77	1.906	20.35
5	1.902	23.09	1.906	19.89
6	1.894	23.76	1.897	20.98
7	1.889	24.51	1.901	20.45
8	1.888	24.41	1.901	20.71
9	1.893	23.43	1.903	20.65
10	1.888	24.29	1.901	20.62

D.5 所得 J_c 的不确定度评定

250 nm 厚的 DyBCO 超导膜(2 cm×2 cm)在判据 $E_c=100 \mu\text{V/m}$ 下定义的 J_c 和 n -值的典型实验数据如下所示:

16 个不同点的 $J_c(10^{10} \text{ A/m}^2)$ 和 n -值: 2.404 (27.5), 2.395 (26.9), 2.396 (27.4), 2.409 (26.6), 2.455 (27.0), 2.432 (26.8), 2.421 (26.6), 2.450 (25.0), 2.423 (26.3), 2.440 (25.2), 2.448 (26.9), 2.481 (26.1), 2.455 (26.1), 2.456 (26.0), 2.450 (26.0), 2.452 (26.0)。

其平均值 $\bar{X}=2.4354$, $s=0.025025$, $u_A=s/\sqrt{N}=0.0062563$, $\text{COV}=s/\bar{X}=0.0103(1.03\%)$ 。

上述 J_c 数据是使用表 1 中的线圈 1 通过 U_3 测量得到, 对应 $k'=(82.2\pm 2.4)\text{mm}^{-1}$ (D.2)。起源于电场 U_3 测量的实验不确定度和起源于 J_c 分布的不确定度合起来的相对标准不确定度(A 类)为 $u_A(J_c)=(0.006256/2.435)\times 100=0.257\%$, 这要比 k' 的相对标准不确定度小很多, $u_c(k')/k'=(2.409/82.2)\times 100=2.93\%$ 。来源于 E_{avg} 的不确定度为 $u_B(E_{\text{avg}})=6.39/\sqrt{3}=3.68\%$ ($n=26$)。最终相对合成标准不确定度为:

$$\begin{aligned} u_c(J_c) &= \{[u_c(k')/k']^2 + u_B(E_{\text{avg}})^2 + u_A(J_c)^2\}^{1/2} \\ &= (2.93^2 + 3.68^2 + 0.257^2)^{1/2} = 4.71\% \quad \dots\dots\dots (\text{D.6}) \end{aligned}$$

小于目标值 10%。

利用相同的测试线圈和超导膜样品进行循环对比实验得到的 J_c 和 n -值如下^[19]:

4 个不同点的 $J_c(10^{10} \text{ A/m}^2)$ 和 n -值: 2.287 (27.9), 2.291 (26.2), 2.189 (26.2), 2.222 (26.6)。

其平均值 $\bar{X}=2.2472$, $s=0.050082$, $u_A=s/\sqrt{N}=0.025041$, $\text{COV}=s/\bar{X}=0.0223(2.23\%)$ 。

上述 J_c 数据是使用 RL 消除电路(图 B.1)通过 U_3 测量获得的, 由于信噪比 S/N 的限制^[19], 在这里确定 I_{th} 时使用了稍大的判据 $2\pi L_c=U_3/fI_0=10 \mu\Omega \cdot \text{s}$ 。 J_c 的相对偏差 $(2.435-2.247)/2.435=0.0772=7.72\%$, 超过了预计的相对合成标准不确定度 4.7%, 这可能是由于大的 $2\pi L_c$ 使得 E_{avg} 的不确定度超出了 D.2 中的预计。但相对偏差仍然明显小于目标相对合成标准不确定度 10%。

D.6 揭示超导膜边缘效应的实验结果

利用计算机控制的线圈扫描系统对三次谐波 J_c 测量的超导膜边缘效应进行研究^[15]。一个具有均匀 J_c 分布的 10 mm 宽的 YBCO/CeO₂/蓝宝石衬底, 放置在并排的两个与 YBCO 膜基底厚度相同的蓝宝石衬底中间。线圈如图 D.1 中所示直线进行扫描。图 D.1a) 给出了 $Z_1=0.2 \text{ mm}$ 时使用表 1 中的线圈 2(外径 3.6 mm)测得的 J_c 对线圈中心位置的依赖关系。线圈中心位置在 $-2.6 \text{ mm} \sim +3.4 \text{ mm}$ 范围内可获得正确的 J_c 值。为了消除边缘效应, 远离边缘的必要距离计算为 $[10-(2.6+3.4+3.6)]/2=0.2 \text{ mm}$ 。使用表 1 中的线圈 3(外径 2.2 mm)的类似实验表明当线圈中心位置在 $-4.0 \text{ mm} \sim +3.2 \text{ mm}$ 范围内可获得正确的 J_c 值[图 D.1b)], 由此得到远离边缘的必要距离为 $[10-(4.0+3.2+2.2)]/2=0.3 \text{ mm}$ 。这个结果表明线圈 3 测量的必要距离比线圈 2 的大, 这可能是因为前者有更多磁场存在于线圈区域外。

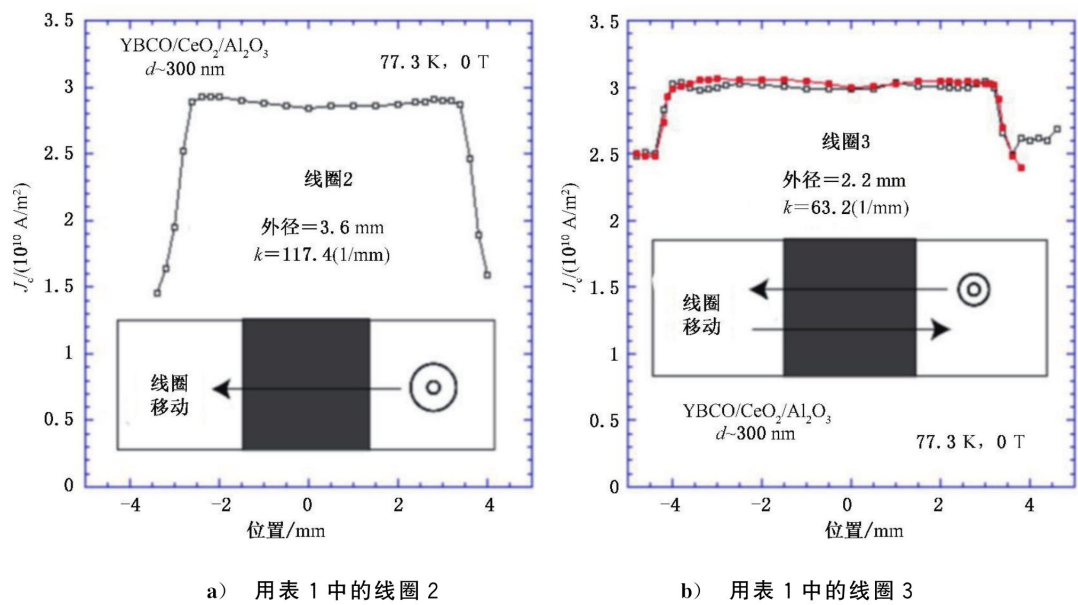


图 D.1 线圈相对超导膜的位置对 J_c 测量影响

参 考 文 献

- [1] ANCASTER, M.J. in *Passive Microwave Device Applications of High-Temperature Superconductors*, Cambridge University Press, 1997, p. 144.
- [2] KINDER, H., BERBERICH, P., PRUSSEIT, W., RIEDER-ZECHA, S., SEMERAD, R. and UTZ, B. YBCO film deposition on very large areas up to 20×20 cm, *Physica C*, 1997, 282 - 287, p. 107.
- [3] GROMOLL, B., RIES, G., SCHMIDT, W., KRAEMER, H.-P., SEEBACHER, B., UTZ, B., NIES, R., NEUMUELLER, H.-W., BALTZER, E., FISCHER, S. and HEISMANN, B. Resistive fault current limiters with YBCO films-100 kVA functional model. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1999, 9, p. 656.
- [4] HYUN, O.B., KIM, H.R., SIM, J., JUNG, Y.H., PARK, K.B., KANG, J.S., LEE, B. W. and OH, I.S. 6.6 kV resistive superconducting fault current limiter based on YBCO films. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2005, 15, p. 2027.
- [5] YAMASAKI, H., ARAI, K., KAIHO, K., NAKAGAWA, Y., SOHMA, M., KONDO, W., YAMAGUCHI, I., MATSUI, H., KUMAGAI, T., NATORI N. and HIGUCHI, N. 500 V/200 A fault current limiter modules made of large-area MOD-YBa₂Cu₃O₇ thin films with high-resistivity Au-Ag alloy shunt layers. *Supercond. Sci. Technol.*, 2009, 22, p. 125007.
- [6] YIM, S.W., KIM, H.R., HYUN, O.B., SIM, J., PARK, K. B. and LEE, B. W. Optimal design of superconducting fault detector for superconductor triggered fault current limiters. *Physica C*, 2008, 468, p. 2072.
- [7] LEE, B.W., PARK, K.B., SIM, J., OH, I.S., LEE, H.G., KIM, H.R. and HYUN, O. B. Design and Experiments of Novel Hybrid Type Superconducting Fault Current Limiters. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2008, 18, p. 624.
- [8] TOSAKA, T., TASAKI, K., MARUKAWA, K., KURIYAMA, T., NAKAO, H., YAMAJI, M., KUWANO, K., IGARASHI, M., NEMOTO, K. and TERAII, M. Persistent current HTS magnet cooled by cryocooler (4)—persistent current switch characteristics. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2005, 15, p. 2293.
- [9] TOSAKA, T., OHTANI, Y., ONO, M., KURIYAMA, T., MIZUMAKI, S., SHIBUI, M., NAKAMOTO, K., TACHIKAWA, N., MORIKAWA, J., OGAWA, Y. and YOSHIDA, Z. Development of Persistent-Current Mode HTS Coil for the RT-1 Plasma Device. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2006, 16, p. 910.
- [10] CLAASSEN, JH., REEVES, ME. and SOULEN, Jr. RJ. A contactless method for measurement of the critical current density and critical temperature of superconducting films. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, 62, p. 996.
- [11] POULIN, G.D., PRESTON, J.S. and STRACH, T. Interpretation of the harmonic response of superconducting films to inhomogeneous AC magnetic fields. *Phys. Rev. B*, 1993, 48, p. 1077.
- [12] HOCHMUTH H. and LORENZ, M. Inductive determination of the critical current density of superconducting thin films without lateral structuring. *Physica C*, 1994, 220, p. 209.
- [13] HOCHMUTH, H. and LORENZ, M. Side-selective and non-destructive determination of the critical current density of double-sided superconducting thin films. *Physica C*, 1996, 265, p. 335.

- [14] YAMASAKI, H., MAWATARI, Y. and NAKAGAWA, Y. Nondestructive determination of current-voltage characteristics of superconducting films by inductive critical current density measurements as a function of frequency. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82, p. 3275.
- [15] YAMASAKI, H., MAWATARI, Y., NAKAGAWA, Y., MANABE, T. and SOHMA, M. Automatic measurement of the distribution of J_c and n -values in large-area superconducting films using third-harmonic voltages. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2007, 17, p. 3487.
- [16] YAMASAKI, H., MAWATARI, Y. and NAKAGAWA, Y. Precise Determination of the Threshold Current for Third-Harmonic Voltage Generation in the AC Inductive Measurement of Critical Current Densities of Superconducting Thin Films. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2005, 15, p. 3636.
- [17] MAWATARI, Y., YAMASAKI, H. and NAKAGAWA, Y. Critical current density and third-harmonic voltage in superconducting films. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81, p. 2424.
- [18] YAMADA, H., MINAKUCHI, T., ITOH, D., YAMAMOTO, T., NAKAGAWA, S., KANAYAMA, K., HIRACHI, K., MAWATARI, Y. and YAMASAKI, H. Variable-RL-cancel circuit for precise J_c measurement using third-harmonic voltage method. *Physica C*, 2007, 451, p. 107.
- [19] YAMADA, H., MINAKUCHI, T., FURUTA, T., TAKEGAMI, K., NAKAGAWA, S., KANAYAMA, K., HIRACHI, K., OTABE, E.S., MAWATARI, Y. and YAMASAKI, H. Wide band-RL-cancel circuit for the E-J property measurement using the third-harmonic voltage method. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2008, 97, p. 012005.
- [20] YAMASAKI, H., MAWATARI, Y., NAKAGAWA, Y. and YAMADA, H. Nondestructive, inductive measurement of critical current densities of superconducting films in magnetic fields. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2003, 13, p. 3718.
- [21] OHKI, K., YAMASAKI, H., DEVELOS-BAGARINAO, K. and NAKAGAWA, Y. Enhanced random pinning with oxygen annealing in YBCO films prepared by large-area pulsed laser deposition. *Supercond. Sci. Technol.*, 2008, 21, p. 045004.
- [22] SIMON, R.W., HAMMOND, R.B., BERKOWITZ, S.J. and WILLEMSSEN, B.A. Superconducting microwave filter systems for cellular telephone base stations. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92, p. 1585.
- [23] CHEGGOUR, N., EKIN, J.W., CLICKNER, C.C., VEREBELI, D.T., THIEME, L. H., FEENSTRA, R., GOYAL, A. and PARANTHAMAN, M. Transverse compressive stress effect in Y-Ba-Cu-O coatings on biaxially textured Ni and Ni-W substrates. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2003, 13, p. 3530.
- [24] NAKAGAWA, Y., MAWATARI, Y., YAMASAKI, H., MURUGESAN, M. and DEVELOS-BAGARINAO, K. Angular hysteresis in the critical current density of laser-patterned RE-Ba₂Cu₃O_y films. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2007, 17, p. 3597.
- [25] Thermal expansion coefficient data of typical polyimide films are at http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/assets/downloads/pdf/summaryofprop.pdf
- [26] MAWATARI Y. and CLEM, J.R. Analytical model of the response of a superconducting film to line currents. *Phys. Rev. B*, 2006, 74, p. 144523.
- [27] NADAMI, T., OTABE, E.S., KIUCHI, M. and MATSUSHITA, T. Dependence of induced third harmonic voltage on width of superconducting coated conductor. *Physica C*, 2004, 412 - 414, p. 1011.
- [28] GRIMALDI, G., BAUER, M. and KINDER, H. Continuous reel-to-reel measurement of

critical currents of coated conductors. Appl. Phys. Lett., 2001, 79, p. 4390.

[29] GRIMALDI, G., BAUER, M., KINDER, H., PRUSSEIT, W., GAMBARDELLA, Y. and PACE S. Magnetic imaging of YBCO coated conductors by Hall probes. Physica C, 2002, 372 - 376, p. 1009.

[30] CLAASSEN, J.H. Measurement of the Critical Current and Flux Creep Parameters in Thin Superconducting Films Using the Single Coil Technique. IEEE Trans. Appl. Supercond., 1997, 7, p. 1463.

[31] SUMIYOSHI, F., MATSUYAMA, M., NODA, M., MATSUSHITA, T., FUNAKI, K., IWAKUMA, M. and YAMAFUJI, K. Anomalous Magnetic Behavior due to Reversible Fluxoid Motion in Superconducting Multifilamentary Wires with Very Fine Filaments. Jpn. J. Appl. Phys., 1986, 25, p. L148

[32] MATSUSHITA, T., OTABE, E.S. and NI, B. Effect of reversible fluxoid motion on AC susceptibility of high temperature superconductors. Physica C, 1991, 182, p. 95.

[33] YOSHIDA, T., SHIBATA, M., KIUCHI, M., OTABE, E.S., MATSUSHITA, T., FUTAMURA, M., KONISHI, H., MIYATA, S., IBI, A., YAMADA, Y. and SHIOHARA, Y. Evaluation of film thickness dependency of the reversible fluxoid motion in the third harmonic voltage method. Physica C, 2007, 463-465, p.692.

[34] KIUCHI, M., YAMATO H. and MATSUSHITA, T. Longitudinal elastic correlation length of flux lines along the c-axis in superconducting Bi-2212 single crystal. Physica C, 1996, 269, p. 242.

[35] KIM, S.B. The defect detection in HTS films on third-harmonic voltage method using various inductive coils. Physica C, 2007, 463 - 465, p. 702.

[36] ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995)

[37] ISO/IEC Guide 99:2007. International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM)

[38] TAYLOR, B.N. and KUYATT, C.E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. NIST Technical Note 1297. 1994 (Available at <<http://physics.nist.gov/Pubs/pdf.html>>)

[39] KRAGTEN, J. Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique. Analyst. 1994. 119. 2161-2166

[40] EURACHEM / CITAC Guide CG 4 Second edition:2000. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement

[41] [cited 2013-04-24] Available at http://www.gum.dk/e-wb-home/gw_home.html

[42] [cited 2013-04-24] Available at <<http://www.isgmax.com/>>

[43] CHURCHILL, E., HARRY, H.K., and COLLE, R. Expression of the Uncertainties of Final Measurement Results. NBS Special Publication 644 (1983)

[44] JAB NOTE Edition 1:2003. Estimation of Measurement Uncertainty (Electrical Testing / High Power Testing). [cited 2013-04-24] Available at <<http://www.jab.or.jp>>.

[45] IEC 61788-3, Superconductivity—Part 3: Critical current measurement—DC critical current of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors.

[46] HUSE, D.A., FISHER, M.P.A. and FISHER, D.S. Are superconductors really superconducting? Nature, 1992, 358, p. 553.

[47] YAMASAKI, H., MAWATARI, Y., NAKAGAWA, Y. and YAMADA, H. Evaluation of uncertainty in the inductive measurement of critical current densities of superconducting films using third harmonic voltages, *Cryogenics*, 2012, 52, p. 544.

[48] NAKAO, K., HIRABAYASHI, I. and TAJIMA, S. Application of an inductive technique to the characterization of superconducting thin films based on power law I-V relations. *Physica C*, 2005, 426-431, p. 1127.

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
电子学特性测量 大面积超导膜的
局域临界电流密度及其分布
GB/T 39843—2021/IEC 61788-17:2013

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2021年3月第一版

*

书号: 155066 · 1-65039

版权专有 侵权必究



GB/T 39843-2021