

測定超导体临界特性曲綫的新方法*

陈普芬 郑国光 管惟炎

提 要

本文描述了測定超导体临界特性曲綫的持续电流方法。和文献上通常采用的四引綫方法相比较,本方法具有下列优点: (1) $I_c(H)$ 曲綫的物理意义明确; (2) 避免了向液氦杜瓦瓶內输入大电流时技术上的困难; (3) 沒有烧坏样品的危险。

用本方法測量了冷加工鋳綫的 $I_c(H)$ 曲綫, 結果証明了以前用四引綫方法所得 $I_c(H)$ 特性曲綫中峯的存在。

一、引 言

在恆定温度下, 超导体的临界电流 I_c 与外加磁場 H 之間的依賴关系曲綫—— $I_c(H)$ 曲綫——通常称作超导体的临界特性曲綫。

測定这一特性曲綫的重要性可由以下两方面來說明:

第一, 在設計超导体磁場时, 首先必須掌握超导材料 $I_c(H)$ 曲綫的資料^[1,2]。事实上, 人們利用超导体获得強磁場就是从发现某些超导材料具有合适的 $I_c(H)$ 特性曲綫才开始的^[3,4]。

第二, $I_c(H)$ 特性曲綫除随温度、样品的組分而改变外, 同时它还是結構灵敏的量, 曲綫形状与数值大小, 受样品的冷加工及热处理的严重影响^[5,6]。研究 $I_c(H)$ 曲綫与样品状态間的关系, 对闡明在硬超导体中破坏超导电性的机理有重要的意义。例如, 通过研究 Pb-Sb 合金脫溶过程对 $I_c(H)$ 曲綫的影响^[7] 就曾导致如下的重要結論: 強磁場超导体必須同时具有小的电子自由程和高度的不均匀性。

迄今文献上都采用四引綫方法測量超导体的 $I_c(H)$ 特性曲綫^[8]: 在恆定場強中, 逐漸增加輸入样品中的电流 (或与此相反, 固定样品中的电流, 逐漸增加場強), 直到样品电位引綫間出現某一可检测出的电压降时 (通常取 10^{-9} — 10^{-7} 伏) 即认为样品处于临界特性曲綫上的状态。

如上定义的 $I_c(H)$ 曲綫, 在物理含义上相当不确切。首先, 它与最小可检测出的电压降的选择有关^[9]。而且, 無論选择多么小的电压降, 曲綫上的状态均表明在样品中已不复存在連續的超导通路, 所取 $I_c(H)$ 值实际上大于最大可允許的超导电流值 (临界电流值)。其次, 在选定最小可观察电压降后, $I_c(H)$ 曲綫还和样品的尺寸有关。例如, 同样直径的样品, 长者比短者的 $I_c(H)$ 值要小。更为重要的是: 用四引綫法測得的 $I_c(H)$ 曲綫, 其物理状态在曲綫的不同部位并不相当。在弱場区, 临界电流很大, 曲綫上的状态

* 1964 年 11 月 10 日收到。

对应于在样品上出现了一个较小的电阻；而在强场区，情况则正好相反，临界电流小，必须使样品电阻增高到足够大的值时，样品两端的电压降才达到与大 I_c 时同样大小的可观察值。

通常采用的四引线方法中还存在技术上的困难。有些样品的临界电流高达数十、数百安培，没有特殊的措施，向液氮杜瓦瓶内输入这样大的电流是有困难的。此外，当样品具有较大的 $I_c(H)$ 值时，往往在破坏超导后即烧断^[7]，不再能继续进行测量。因此，相当多的研究工作^[7,8,10]中只测定了 $I_c(H)$ 曲线的某一部分 (I_c 较小的一段)。

本文提出了测定超导体临界特性曲线的一种新方法，基本上排除了四引线方法的困难。首先，我们将描述在液氮温度下能提供大电流的电流源装置，然后介绍 $I_c(H)$ 曲线的测量方法和在冷加工铌线上测得的结果。顺便指出，我们所设计的电流源装置，同时还可以用来作为连续调节“冻结”场的装置。

二、可连续调节的持续电流源

1. 实验装置

利用永久磁铁的移动，在封闭的超导回路中激发持续电流，作为测定超导体样品 $I_c(H)$ 曲线所需的电流源。

实验装置如图 1 所示，上下两个铌线圈 2 与 6 构成一封闭回路。上线圈内置一圆柱形钕古-5 永久磁铁 1，组成装置的电流源部分。永久磁铁可在线圈内作轴向移动，从而改变回路中持续电流的大小。

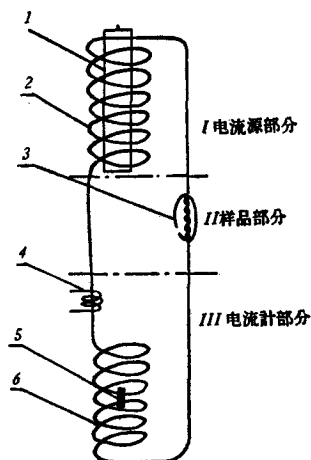


图 1 电流源装置示意图

1—永久磁铁； 2—铌线上线圈；
3—Nb₃Sn 接头； 4—加热丝；
5—铌电阻丝及探测线圈； 6—
铌线下线圈

在下线圈内放置探测线圈和铌电阻丝 5，用以测量激发电流所产生的场强。由下线圈的磁场-电流曲线可以确定持续电流的大小。破坏回路局部的超导用的锰铜加热丝 4 直径为 0.1 毫米，绕在两线圈间一段铌线上。破坏超导时用的加热功率为 0.8 瓦。下线圈、铌电阻丝、探测线圈及锰铜加热丝组成装置的电流计部分。

待测样品 3 串联在两线圈间的 Nb 线端点之间。为了研究电流源本身的工作情况，在本节讨论的实验中，没有放置待测样品。将铌线两端长约 30 毫米的一段分别热镀上一薄层锡后再绞在一起，在 10^{-5} 毫米汞柱的真空下，加热到 950°C 左右烧结 1—3 分钟。在这样作成的 Nb₃Sn 接头上再敷上 In-Sn 合金后，保证了接触是超导的，而且，其临界电流值可大于铌线本身或样品的临界电流值。

上、下线圈的黄铜轴架（图 4）有相同尺寸，其内径为 10.8 毫米、壁厚为 0.8 毫米、高为 30 毫米。铌线直径为 0.8 毫米，用纸缠在线外作绝缘。上下二线圈分别为 169 及 174 匝。永久磁铁直径为 10 毫米，长为 56 毫米，由杜瓦瓶顶盖上的提升装置操纵可作上下 60 毫米长的运动。室温下充磁后，其饱和磁感应强度为 11,000 高斯。

工作时，整个装置置于盛液氮的杜瓦瓶中。

2. 实验结果和讨论

在最初的一些实验中,在向杜瓦瓶内输入液氮以前,永久磁铁处于图 1 所示的起始位置。输入液氮后,铌线圈即“冻结”住永久磁铁提供的磁通。这时,若将永久磁铁连续地从上线圈提出,由于超导回路中的磁通守恒,铌线圈内将激发起持续电流,从下线圈内的探测器上可观察到铌电阻值(与磁场值对应)的不断增高。

实验结果用图 2 表示。纵坐标是铌电阻值,横坐标为永久磁铁上提的距离。由图 2 曲线 1 可见,在整个 60 毫米长的磁铁提升过程中,先后曾发生两次磁场跳跃(铌电阻值突然下降到接近零场时的值)。当磁铁升到最高位置后,由锰铜线加热使铌线圈局部破坏超导,持续电流作很快的衰减,和探测线圈相联结的冲击电流计给出偏转,由此测出下线圈内曾激发起的磁场强度。铌线圈中通过的持续电流值可以根据测出的场强及下线圈的磁场-电流标定曲线来确定。

下线圈的磁场-电流关系曲线是在液氮温度下标定的。由外电源供给下线圈(图 1 中的回路此时被切断)一定大小的电流,突然切断此电流,并测出电流计冲击偏转所对应的场强。

在锰铜线加热局部破坏铌线圈超导的情况下,将永久磁铁重新降到起始位置,然后重复上述实验。这时,在磁铁上升过程中,只发生了一次磁场跳跃。跳跃发生的位置在前次实验中两次跳跃之间(图 2 曲线 2)。

图 2 曲线 3 是第三次重复实验所得结果,在永久磁铁上提到 50 毫米高度附近时,下线圈内的场强曾增加到 2000 奥斯特以上,但在这一高度以上发生了磁场跳跃,最终所获持续电流值仍然很小。

第四次及第五次重复实验时,持续电流在磁铁上提过程中一直连续增大,不再发生跳跃(图 2 曲线 4 及 5)。这一装置所获得的最大持续电流为 38 安培。

要在整个 60 毫米长提升永久磁铁的过程中不发生磁场跳跃,必须使线圈经受上述三次升降的“锻炼”。

关于发生磁场跳跃的原因,可作如下的讨论:由于图 1 所示的起始位置,永久磁铁的体外散磁场必然部分地“冻结”在铌线圈体内(硬超导体在磁场中冷却时没有完全的 Meissner 效应),从而降低了铌线圈的临界电流值。当提升永久磁铁达某一高度时,线圈的某一局部,由于体内“冻结”了磁通,同时又处在磁铁的散磁场中,其临界电流比其他部分低,这一局部首先破坏了超导,引起磁场跳跃。当持续电流衰减到很小值时,这一局部的铌线圈又恢复了超导,但这时原先的“冻结”磁通在破坏超导时已被赶走,这一段铌线圈中新“冻结”的磁通

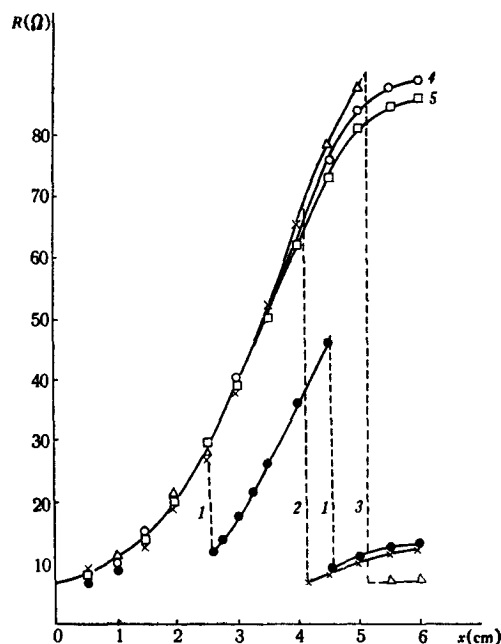


图 2 下线圈内铌电阻值随永久磁铁提升距离的变化曲线
●——第 1 次; ×——第 2 次; △——第 3 次;
○——第 4 次; □——第 5 次

可能小于原先的值(因为线圈与永久磁铁有了相对位移),因而当下次重复实验永久磁铁重新被提到同一位置时,不再发生磁场跳跃。但在其他地方,“冻结”磁通仍未赶走,因而仍有可能发生跳跃。只有经过了若干次“锻炼”,相应位置处的“冻结”磁通陆续被赶走,铌线的临界电流才接近其正常值,可以在永久磁铁上提过程中不再发生磁场跳跃。

以上解释为下述实验所证实。在输入液氮以前,先将永久磁铁提出线圈到相当高的位置,这样其散磁场不再能“冻结”在铌线体内。在液氮输入后,在锰铜线加热的条件下降下永久磁铁到图 1 所示的正常起始位置,再开始提升磁铁(锰铜线停止加热),重复以上实验。这时,不要任何“锻炼”即可避免磁场跳跃的发生。铌电阻值随磁铁上升而增大的曲线在第一次上提时即有类似图 2 曲线 4 和曲线 5 的结果。

值得注意的是:在铌线圈处于超导态时,向上线圈内下放永久磁铁,锰铜线必须加热;否则,永久磁铁即为其自身所激发的反向磁场所退磁。在一次这样的实验中,永久磁铁被退磁后剩余的磁感应强度降为 3200 高斯。当锰铜线加热有足够功率可使永久磁铁下降不能激起持续电流时,退磁即被避免。

当永久磁铁上提后,立即令其重新下放(即不用加热线加热破坏超导),铌电阻值和磁铁位置的关系曲线是可逆的。这时,下放永久磁铁虽也引起线圈中持续电流的减少,但磁场方向与上升时仍一致,所以永久磁铁不被退磁。实验观察证实了上述现象的存在。

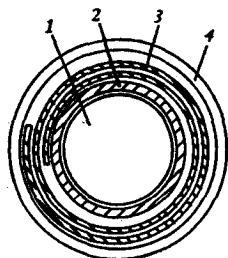


图 3 线圈与永久磁铁之间加入铅铋屏蔽片时横断面示意图

- 1——可移动的永久磁铁;
2——线圈轴架;
3——铅铋合金屏蔽片;
4——铌线圈

改变上下两线圈的匝数可使获得的最大持续电流值 I_{\max} 改变。表 1 是不同线圈匝数时得到的结果。

由表 1 线圈 I, II, III 的结果可见,匝数愈少,则所获持续电流值愈大。线圈 III 和线圈 IV 有相同匝数,但后者在上线圈与永久磁铁之间增加了两层厚 0.5 毫米的铅铋合金屏蔽片,屏蔽片绕在线圈轴架外,其横断面见图 3,其作用在于减弱永久磁铁散磁场对铌线圈的影响。两层铅铋片间有很好的绝缘,以防止屏蔽层构成封闭的回路。在用线圈 III 作实验时,由于永久磁铁散磁场的影响,在磁铁上提到一定高度时即发生磁场跳跃,最大持续电流只有 101 安培。但当有了屏蔽散磁场的铅铋片后(线圈 IV),磁铁上升过程中即不再发生跳跃,最大持续电流值达 146 安培。

表 1 上下两线圈的匝数及所获最大持续电流值

线圈	I	II	III	IV*
上线圈匝数	169	97	24	24
下线圈匝数	174	103	26	26
I_{\max} (安培)	38	68	101	146

* 在线圈与永久磁铁之间有铅铋合金的屏蔽层。

三、 $I_c(H)$ 曲线的测定

1. 样品及实验装置

图 4 是测定超导体 $I_c(H)$ 曲线所用装置的低温部分。和前节相似,装置也由电流

源、待测样品和电流计三部分組成。

測量样品 5 是冷加工后的鈹綫,直径 0.3 毫米,长 100 毫米。鈹綫的中部长約 4.6 毫米的一段用沙紙磨細,直径縮小为 0.14 毫米。样品串联在上下两綫圈間的鈹綫端点之間。样品与綫圈間的連結采用前节所述方法,即用燒結 Nb_3Sn 作超导接触,并在四周敷以大量 In-Sn 合金。上述安排保證了鈹綫样品的中間部分(直径为 0.14 毫米的一段)是整个超导迴路中最薄弱的环节,它的临界电流值即决定整个綫圈和样品迴路的临界电流。

測量 $I_c(H)$ 曲綫用的外磁場由处于装置中部的小电磁鉄 4,6 提供。磁鉄极头直径为 8 毫米,极間距为 0.3 毫米,激发磁鉄的綫圈 6 由繞在黃銅軸架上的一对漆包銅綫綫圈組成,銅綫直径 0.14 毫米,每一綫圈高 8 毫米,計 2000 匝。激发磁鉄的电源为鉛蓄電池。

实际測量时使用的上、下鈹綫綫圈分別为 18 和 36 匝。上綫圈与永久磁鉄之間有鉛鈹合金的屏蔽层。为減少下綫圈中磁通在整个冻结磁通中所占比例,下綫圈軸架的内径减小为 6 毫米。持續电流源、样品及电磁鉄、电流計三部分之間有足够的距离,以尽量減少相互之間的散磁場影响。

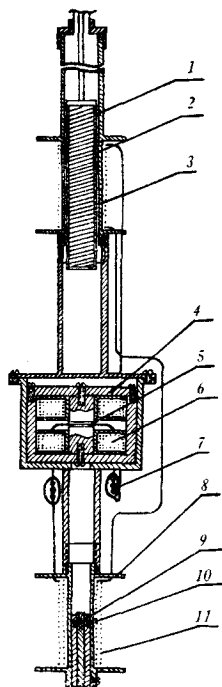


图 4 測定超导体临界特性曲线的装置图

1——永久磁鉄; 2——薄壁德銀管; 3——上綫圈軸架; 4——电磁鉄鉄心; 5——样品; 6——銅綫圈; 7—— Nb_3Sn 接头; 8——下綫圈軸架; 9——鈹电阻絲; 10——探测綫圈; 11——鈹綫綫圈

如前所述,下綫圈的磁場-电流关系曲綫是在液氮温度下单独标定的。

由鈹电阻的飽和值,經由上述二标定曲綫,可以确定

2. 測量方法

測量时,样品直径最細的部分置于电磁鉄极头之間。样品中的电流方向与外磁場方向互相垂直。

輸入液氮后,将永久磁鉄下放到上綫圈內(下放时,錳銅綫加热),即可开始 $I_c(H)$ 曲綫的測量。我們曾用了两种略有不同的測量方法。

方法一 在零場及不同場強下,将永久磁鉄緩慢地提出上綫圈,同时观察下綫圈內鈹电阻絲的电阻值的变化。当持續电流上升到相当于該磁場下样品的临界电流时,鈹电阻值即保持恆定。这时,永久磁鉄繼續上提所激发的电流自动衰减到样品的临界电流值。当永久磁鉄提升得足够慢,超过临界电流部分的电流衰减不引起样品显著发热时,可以避免发生磁場跳跃。

鈹电阻絲电阻值所对应的磁場強度由下綫圈內的探测綫圈来标定(将永久磁鉄移动到一定位置后,同时讀出鈹电阻值及加热破坏超导后引起的电流計冲击偏轉)。由于鈹电阻在不同次液氮实验时重复性較差,标定工作是与 $I_c(H)$ 曲綫的測量在同一次液氮实验中完成的。

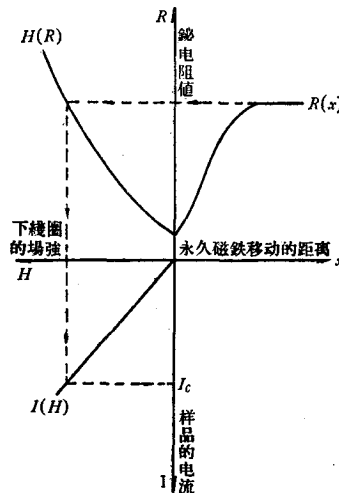


图 5 在恆定場強下,測定样品临界电流值的方法的示意图

样品处于横向场中的临界电流 $I_c(H)$ 。这一测量过程,可简单地以图 5 来表示。

在外场为零或场强很低时,样品的临界电流很大,超导-正常转变较陡,结果使样品达到临界条件时总是伴随着发生磁场跳跃。在这种情况下,本测量方法即不再有效。

方法二 在零场及不同场强下,将永久磁铁缓慢地提出上线圈。当电流增大到相当于样品的临界条件时,由于超导-正常转变较陡,通常会发生磁场跳跃(突然下降为零)。由和探测线圈相连接的冲击电流计的偏转可以确定样品的临界电流 $I_c(H)$ 。

在强场区域,临界电流较小,超导-正常转变较平缓,可以同时用两种方法测定 $I_c(H)$,所得结果很好地符合。

在永久磁铁固定不动的情况下,改变小电磁铁线圈中的电流,下线圈内的铂电阻值没有可观察到的变化;永久磁铁提升到不同位置后,加热破坏超导,使持续电流衰减为零,此时铂电阻给出相同的电阻值;由不同的起始位置提升永久磁铁,所测得的 $I_c(H)$ 值相等。

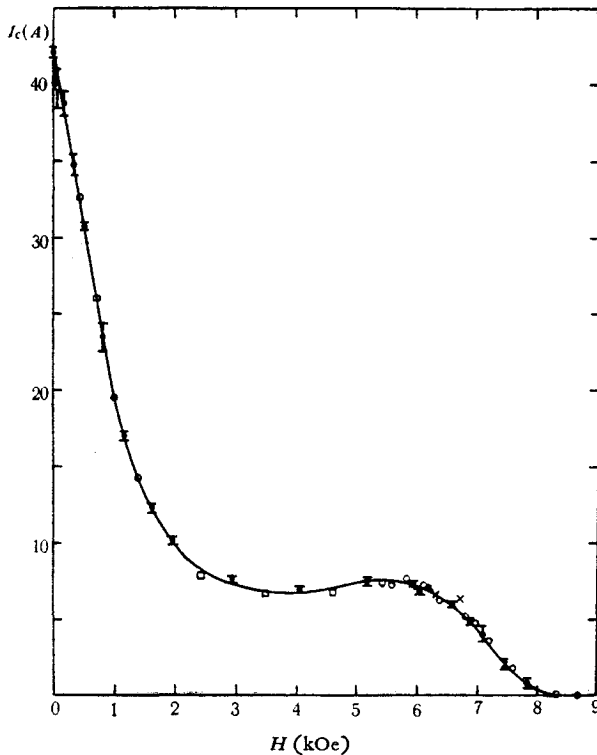


图 6 Nb 线样品的临界特性曲线

×——1964年7月3日; ○——1964年7月10日;
□——1964年7月15日; Δ——同一磁场下在7月
3日、8日、10日和15日中各测量值的平均值
 $H \perp I, T = 4.2^\circ\text{K}$, Nb 线直径 0.14 毫米

文献上所采用的测定 $I_c(H)$ 曲线的方法发生怀疑。图 6 的曲线是在持续电流条件下测出的,其物理意义很明确,因此, $I_c(H)$ 曲线上存在峰值的事实,可以认为已被最后肯定,虽然其机理尚不十分清楚。

以上三者证明装置三部分之间的散磁场影响确实是很小的。

3. 冷加工铌线的 $I_c(H)$ 曲线

利用我们提出的方法测定了冷加工铌线在 4.2°K 时的临界特性曲线。测量结果由图 6 来表示。

在四次液氮实验中得到结果很好符合,实验点可描绘为同一条曲线。在弱磁场区域,铌线的临界电流随场强增高而迅速下降,但当磁场足够强时,临界电流随磁场的变化出现了一个平缓的区域。和 LeBlanc 及 Little^[11] 最早的观测相似,在铌的 $I_c(H)$ 曲线上存在一个峰。DeSorbo^[12,13] 的仔细研究认为峰的存在和铌中存在氮和氧等间隙溶质有关。

一般曾认为,磁场总是不利于超导的。但当在超导体的临界特性曲线上出现峰值时则相反,磁场可以有利于超导。在某种情况下,磁场可驱使样品由正常态过渡到超导态。这一反常行为曾引起一些人对

四、討 論

和文献上通常采用的四引线方法比较, 本文提出的方法有下列优点:

1. 临界特性曲线的物理意义明确。图 6 中的实验点表示, 在横向磁场中, 样品体内可允许通过的最大超导电流——临界电流。在四引线方法中, 临界电流的定义不很确定, 它依赖于实验时所选用测量仪器的灵敏度。而且, 和实验曲线相对应的状态是已经破坏超导性的状态。

2. 避免了向液氮杜瓦瓶内输入大电流的困难。图 1 所示的电流源装置也可能用于其他具有超导回路的液氮实验中。

3. 保护了样品。由于电流源的内阻为零, 当样品破坏超导后, 电流即自动迅速衰减, 不致烧坏样品。样品多次破坏超导后实验结果仍不变, 这表明破坏超导时样品没有经受显著的热处理。

本装置特别利于测量具有大 $I_c(H)$ 值的样品的特性。但若增加下线圈的匝数, 或改用更灵敏的场强计, 本装置也可适用于测量强场下的小临界电流值。

测量时的步骤必须是, 先由小电磁铁提供一恒定磁场, 然后再激发持续电流。若先激发持续电流, 再改变外磁场, 则随着外磁场的增加, 回路中电流只会减少而不会增加。因此, 在有峰的区域就会出现一个平台。

作好样品与线圈之间的超导接触是本装置技术上的关键。在接触不理想时, 临界特性曲线的弱场区域会出现一平台(即改变外磁场时 I_c 值不变)。

Алексеевский 等人曾将测量样品作成环^[14]或线圈^[15], 然后由内、外磁场的变化来测定样品的临界特性曲线。他们的方法在原则上即不允许测量零场附近的临界电流, 同时这也是四引线方法在技术上感到困难的区域。

“冻结”磁场有一系列优点。但是, 由于不能连续调节, 其应用受到限制。只有要求在恒定磁场下工作的情况下(如比热测量、绝热退磁及某些磁共振实验等), “冻结”磁场才受到欢迎。值得指出的是, 图 1 所示的电流源装置, 同时也是一种可以连续调节的“冻结”磁场装置。移动上线圈内的永久磁铁, 可以连续地改变下线圈内的场强。在我们的实验中, 曾经获得的最大场强是 2370 奥斯特。

张寿恭同志为本实验提供了吕泉古-5 永久磁铁, 李世恕同志帮助烧结了 Nb_3Sn 结头, 李宏成同志提供了小电磁铁的设计资料并参加了讨论, 洪朝生同志仔细阅读过文稿并提出了一些有益的意見, 作者们对他們表示深切的謝意。

参 考 文 献

- [1] Gauster, W. F. and Parker, C. E., High Magnetic Fields (1962), p. 3.
- [2] Wood, M., *Cryogenics*, **2** (1962), 297.
- [3] Kunzler, J. E., Buchler, E., Hsu F. S. L. and Wernick, J. H., *Phys. Rev. Letters*, **6** (1961), 89.
- [4] Kunzler, J. E., *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **6** (1961), 298.
- [5] Treuting, R. G., Wernick, J. H. and Hsu, F. S. L., High Magnetic Fields (1962), p. 597.
- [6] Autler, S. H., Rosenblum, E. S. and Gooen, K. H., *Phys. Rev. Letters*, **9** (1962), 489.
- [7] 张其瑞、曹效文、管惟炎, 物理学报, **20** (1964), 568.
- [8] Kunzler, J. E., *J. Appl. Phys.*, **33** (1962), Suppl. 1042.

- [9] Kim, Y. B., Hempstead, C. F. and Strnad, A. R., *Revs. Mod. Phys.*, **36** (1964), 43.
[10] Heaton, J. W. and Rose Innes, A. C., *Phys. Letters*, **9** (1964), 112.
[11] LeBlanc, M. A. R. and Little, W. A., Proc. of the VIIth Intern. Conference on Low Temperature Physics, edited by G. M. Graham and A. C. Hollis Hallett, p. 362.
[12] DeSorbo, W., *Phys. Rev.*, **132** (1963), 107.
[13] DeSorbo, W., *Phys. Rev.*, **134** (1964), A 1119.
[14] Алексеевский, Н. Е., *ЖЭТФ*, **8** (1938), 1098.
[15] Алексеевский, Н. Е. и Михайлов, Н. Н., *ЖЭТФ*, **41** (1961), 1809.

A NEW METHOD FOR MEASURING THE CRITICAL CHARACTERISTIC CURVES OF SUPERCONDUCTORS

CHEN PU-FUN CHENG GUO-KUANG KUAN WEI-YEN

ABSTRACT

In this paper, a persistent-current method for measuring critical characteristic curves of superconductors has been described. In comparison with the usual four-probe method, this new method possesses the following advantages: (1) The $I_c(H)$ curves thus determined have clear physical significance. (2) The technical difficulty of introducing heavy current into the cryostat is avoided. (3) There is no danger of burn-out of the specimen tested.

The $I_c(H)$ curve of cold worked niobium wire has been determined with this method. The result confirms the existence of the peak in the $I_c(H)$ characteristic observed previously with the four-probe method.