

超导磁体系统的稳定化

苏] B. A. 阿里托夫

B. B. 津克维奇

M. Γ. 克列姆列夫

B. B. 瑟切夫

焦正宽 张其瑞

著

译

国防工业出版社

超导磁体系统的稳定化

〔苏〕 B.A.阿里托夫, B.B.津克维奇 著
M.Γ.克列姆列夫, B.B.瑟切夫
焦正宽 张其瑞 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书全面系统地讨论了超导磁体系统的稳定化问题。着重论述了复合导体的热（低温稳态）稳定性；对内（内禀、绝热）稳定性也作了相当详细的讨论。

原书作为《国际低温工程丛书》被译成英文。

本书可供从事于超导电性的应用、超导磁体的研制和超导材料的制备等工作的科技人员和大学有关专业的学生、研究生参考。

СТАБИЛИЗАЦИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

В. А. Альтов, В. Б. Зенкевич,

М. Г. Кремлев, В. В. Сычев

«Энергия» 1975

*

超导磁体系统的稳定化

〔苏〕 В. А. 阿里托夫, В. Б. 津克维奇 著
М. Г. 克列姆列夫, В. В. 瑟切夫
焦正宽 张其瑞 译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $9\frac{1}{4}$ 234 千字

1982年8月第一版 1982年8月第一次印刷 印数：0,001—2,900册

统一书号：15034·2358 定价：1.15元

译者的话

超导磁体系统是现今超导电性最大量、最有成效的实际应用，而超导磁体系统的稳定化是在设计和使用超导磁体中所面临的一个关键性技术问题。本书系统地讨论了这一问题的各个方面。尤其是在第二篇中，着重地讨论了热（低温稳态）稳定化；在第二篇也相当详细地讨论了内稳定化。本书的主要内容取材于作者们自己的研究成果，这些工作已获得国际上的公认；同时，也总结了在这方面所取得的几乎是所有重要的研究成果。该书已作为“国际低温工程丛书”（The International Cryogenics Monograph Series），译成英文出版。

我们主要是根据俄文版（并参考了英文版）进行翻译的。个别地方没有拘泥于原文，做了适当的变动；改正了原书中的明显错误，并改用了国外文献中通用的参量符号。

由于译者水平所限，必然会有许多错误，衷心地欢迎读者批评指正。

序 言

建造各种用途的超导装置，是现代技术最重要的发展方向之一。超导电性已在动力、电工、高能物理和空间技术等许多领域中获得了应用。

借助于超导磁体系统来获得强磁场，是目前超导电性最广泛的应用。超导磁体系统的各项指标正在迅速地提高，现已建成了储能量很大的超导装置。大型磁体系统的储能量可达几十至几百兆焦耳。当绕组的超导电性被破坏时，如果不采取某种措施加以保护，则能量就以热的形式释放出来，势必造成事故。因此，确立磁体系统安全可靠的运行条件，是一项非常重要的任务。

原则上说，如果采用完全稳定的复合超导体（它是由大量高电导率的正常金属基体和细丝化的超导体所构成）来绕制绕组，那么便可以确保磁体系统具有足够的可靠性。简言之，在这种情况下，如果其电流强度不比临界电流值高出很多，当失超之后，超导磁体系统在一定的时间内可以象常规的低温磁体那样运行着，这时电流从超导体分流到处于低温下的正常金属内。在这种复合导体横截面内，超导体所占的比例很小，所以绕组的平均电流密度比较低。为建造这样的磁体系统，必须确切了解绕组的传热条件以及电流从超导体向正常基体内分流过程的行为。然而，由于磁体在体积和重量上往往是受到限制的，而不得不采用高平均电流密度的绕组，这样，问题就变得更加复杂了。在这种情况下，复合导体内允许添加的正常金属的量是很有限的。因此，关于可靠性问题，不得不寻求某种权宜之计。

建造一个实用的超导磁体系统时，有待解决的一些最重要的问题是：设计实际所需要的稳定度，即确定磁体在什么条件下才

不会失控地转变到正常态；确定整个系统的可靠性，也即确定设计绕组的某种稳定性判据和保护措施，使得磁体由于某种原因而终于转变到正常态时，在转变过程中免遭损坏。本书就讨论了这样一些至关重要的实际问题。

目前，有关超导磁体稳定性问题的种种资料，多以论文形式分散于各种杂志之中，这自然给需要全面了解这一问题现状的专业人员带来了很大的困难。本书是系统地讨论复合导体稳定性问题的初次尝试。对热（低温稳态）稳定化方法给予了特别的注意，同时也相当细致地讨论了内稳定化方法。

本书的取材主要是作者们最近几年来在苏联科学院高温研究所应用超导电性部所取得的研究成果。同时也总结了这方面实际上是所有的重要研究成果。

本书首先是为从事于各种用途的超导磁体系统的研制、建造和运行的科学工作者和工程师，以及有关专业的大学生和研究生而写的。此外，对工作在邻近学科和技术领域（如低温热交换、复合超导体冶金等）的专家们应该也是有用的，在各个领域中关心超导磁体系统的专家们或许也会对本书感兴趣。

愿以十分感激的心情接受读者们的批评意见。

B. B. 瑟切夫

目 录

第 I 篇 超导电性及其应用

第一章 在现代技术中应用超导电性的前景	1
1-1 引言	1
1-2 超导磁体系统	2
第二章 超导电性概论	5
2-1 概述	5
2-2 第 I 类和第 II 类超导体	9
2-3 非理想第 II 类超导体中的磁通蠕动和磁通跳跃	22
2-4 非理想第 II 类超导体的磁通流动态	27
第三章 超导磁体系统的保护	36
3-1 概述	36
3-2 变压器法	39
3-3 向外负载放电	44
3-4 正常区出现的原因	49
3-5 超导体的稳定化及其分类	52

第 II 篇 热稳定化方法

第四章 等温条件下复合导体内正常区的平衡	56
4-1 稳定化超导体的斯特科利模型	56
4-2 超导体-基体界面接触热阻的影响	72
4-3 超导体的有限热导率对复合导体稳定性的影响	76
4-4 液氮沸腾方式的突变对复合导体热平衡条件的影响	83
4-5 复合导体在正常态下的平衡	94
4-6 复合导体的伏-安特性	99
4-7 低阻分流法	102

4-8 实验结果	106
第五章 存在纵向温度梯度时,正常区在复合导体内的平衡	115
5-1 概述	115
5-2 具有纵向温度梯度的复合导体	116
5-3 沸腾方式突变对平衡条件的影响	122
5-4 接触电阻的影响	136
5-5 温度沿长度方向上任意分布时复合导体的稳定性	140
5-6 实验结果	146
第六章 正常区在超导绕组内的传播	158
6-1 研究正常区传播过程的方法	158
6-2 正常区在稀绕绕组内的传播	161
6-3 超流氮冷却绕组的效果	177
6-4 正常区沿复合导体的传播速度	179
第七章 强迫冷却复合导体	185
7-1 概述	185
7-2 强迫冷却复合导体的理论分析	186
7-3 正常区的热平衡条件	193
第八章 正常区在密绕超导绕组内的平衡与传播	196
8-1 密绕超导绕组的基本特征	196
8-2 实验结果	201
8-3 超导螺线管向正常态的转变	205
8-4 在密绕和稀绕绕组内转变过程参量的比较	210

第 I 篇 内稳定复合导体

第九章 第 II 类超导体对于磁通跳跃的稳定性	215
9-1 概述	215
9-2 非理想第 II 类超导体的磁化过程	216
9-3 第 II 类超导体中屏蔽电流的稳定性	220
9-4 存在传输电流时的绝热稳定判据	229
9-5 传输电流相对于有限磁通跳跃的稳定性	233
第十章 多芯直导体	239
10-1 多芯直导体模型	239

10-2	直复合导体的绝热稳定判据	241
10-3	复合导体的电动力学稳定判据	243
第十一章	拧扭和换位复合导体	252
11-1	磁场向拧扭复合导体内部的穿透	252
11-2	传输电流在拧扭导体内的分布及其稳定性	255
11-3	编织(换位)复合导体	260
11-4	获得快变磁场的复合导体	262
附图	复合导体的无量纲伏-安特性	272
参考文献		278
名词索引(中俄英对照)		282

第 I 篇 超导电性及其应用

第一章 在现代技术中应用超导电性的前景

1-1 引言

早在 1911 年卡麦林·翁纳斯^[1-1]发现了超导电现象后不久,就有人对超导电性的实际应用提出了许多设想。翁纳斯本人曾企图用超导螺线管作为电磁铁,通过大电流来获得强磁场^[1-2]。因为超导体的电阻为零,所以其耗电量只用于维持低温就够了。但是这种合乎情理的想法实际上是不现实的,在 1913 年制作这种电磁铁的尝试以失败而告终^[1-3]。后来查明,一般的超导体,在百分之几特斯拉的强度下就转变到了正常态。这便使超导电现象无法付诸实际应用。这种状况一直持续了大约五十年。直到六十年代初,发现一系列合金和化合物,在高达 10 特斯拉数量级的强磁场中,沿超导体流过很大电流时,仍能保持其超导态。这些材料(非理想第 II 类超导体)的发现,使超导电性的实际应用发生了一场革命。从此以后,超导装置的应用研究和试验设计工作得到了蓬勃的发展。在经济上最发达的国家中,许多实验室都在全力以赴地从事这项研究工作。

在现代技术的各个领域(动力和电工,实验物理,宇航,无线电,计算机等)中,超导装置的应用将逐渐实现。

超导电性最有希望的一些应用领域可归纳如下:

1. 各种用途的超导磁体系统;
2. 超导输电线;
3. 计算机的超导逻辑和存储元件;

4. 超导谐振腔和高频电路元件;
5. 超导陀螺仪和加速度计, 无摩擦超导轴承。

1-2 超导磁体系统

超导磁体系统可能的应用领域十分广泛, 并且得到了迅速的发展。这是因为与常规电磁铁相比[●], 超导磁体系统具有更好的经济和运行特性, 在许多场合下, 它提供了一种甚至是唯一可取的解决方案。超导磁体系统具有如下的优点:

1. 超导磁体系统, 因为不需要铁芯, 与常规磁体系统相比, 绕组的许用电流密度要高得多, 其重量可轻 1 ~ 2 个数量级, 并且体积紧凑得多。

2. 由于绕组中实际上完全没有焦耳损耗, 与常规系统相比, 超导磁体系统的固有耗电量同样也低 1 ~ 2 个数量级; 这时电能只消耗在为保持绕组处于液氮温度(即给氮液化器或制冷机供电)上; 而常规磁体系统还需要大量的冷却水, 以便把释放出来的焦耳热排走。

3. 与常规磁体系统相比, 超导磁体系统可以获得更高的磁场; 采用常规的带铁芯的磁体系统, 其场强不能超过 2 特斯拉, 而大型的超导磁体系统, 其磁感应强度现在很轻易地就可达到 4 ~ 6 特斯拉。不过应该指出, 目前有少数的几个实验室有比特(Bitter)型(不带铁芯的, 由正常导体制作的强迫水冷的)电磁铁。这类电磁铁可以在小的体积内产生非常强的磁场(达 25 特斯拉)。但是, 其耗电量很大, 因此, 它只适用于物理研究中。

在某些特殊领域中应用超导磁体系统比起常规系统还具有另外一些优点。例如, 由于超导磁体的紧凑性, 使它可以获得比常规系统高得多的磁感应强度梯度。这对短寿命基本粒子的研究是非常重要的^[1-6]。

● 常规磁体系统指的是带有铁磁材料(通常是铁的)芯子和铜或铝的绕组的电磁铁。

除常规和超导磁体系统外，还可以建造低温(或低温有阻)磁体系统。其绕组由特别纯的金属(铜、铝[●]、钠)绕制，在20 K附近的温度下工作。这些金属在这样低的温度下，其电阻率比室温时低2~3个数量级，绕组中的焦耳热损耗也将相应地减少。这便使低温磁体系统本身的电力消耗显著降低，故比常规磁体具有更大的优越性。但与超导磁体系统相比，低温系统自身需要的电功率至少还要高一个数量级^[1-7]。

当然，在确定选择哪一种类型的磁体系统更为合理时，不仅要考虑它本身耗电量的大小，还应该算出其基建投资费和计入折旧费在内的每年用费，从而进行综合的分析比较。

有人计算了各种(常规的、低温的和超导的)磁体系统的年运行总费用，其结论是：当绕组中的电流密度高于 10^4 安/厘米²时，超导磁体系统在经济上比其它类型的系统都更为有利^[1-8]。

磁流体发电机(一种将热能直接转换成电能的装置)是超导电性的一个重要应用。

到目前为止，已经明确，磁流体发电热电站装置，只有在磁流体发电机中利用超导磁体系统来产生磁场的情况下，在经济上才是合算的。除了重量可以大大减轻和自身耗电极小外，磁流体发电机采用超导磁体系统，与常规磁体系统相比较，具有另一个重要的优点是，超导磁体系统的场强要高得多。由于磁流体发电机的通道长度与发电机内磁感应强度的平方成反比，因此，磁感应强度的增大会导致发电机尺寸的减小。如果将磁感应强度提高到4特斯拉，磁流体发电机的通道长度(与采用常规磁体系统相比)就可以缩短到四分之一。应该指出，随着通道长度的减小，通道壁的热损耗也会降低。

最近几年，各国都在竞相进行超导磁流体发电机的科学研究和实验设计工作。

● 铝是超导体，但它的临界温度非常低($T_c = 1.2\text{K}$)，因此在液氢温度下，它与正常金属一样。

在实验核物理中，也日益广泛地应用各种类型的超导磁体系统。一些大型的超导线圈已用于气泡室、基本粒子加速器，以及在热核研究中作为等离子体约束等所需要的磁体。

在基本粒子加速器中，超导偏转和聚焦磁体系统的应用是很有前途的。采用常规磁体系统，其自身要消耗大量的能量。当采用超导磁体系统时，由于其磁感应强度高，并有可能得到较大的磁场梯度，便可以大大缩短束流实现聚焦的距离。

在电机制造方面，毫无疑义地大功率的发电机和电动机，采用超导绕组是有发展前途的。现代的电機制造业，其特点是单级功率在逐年增加（目前已增至 100 万千瓦）；同时，常规型（钢架和铜绕组）发电机很难设想其单级功率会有任何显著的增加。建造更大的发电机（和电动机）的难题，可以通过利用超导绕组的方法解决。正如大家所熟知的，电机功率实际上是与工作区域的磁感应强度和电枢的电流密度成正比的。在利用超导体时，这些参量都可以提高很多。带有超导绕组的发电机，磁场的磁感应强度为 $6 \sim 7$ 特斯拉量级，电枢的电流密度为 10^4 安/厘米² 时，其输出功率可以比相同尺寸的常规发电机大两个数量级。目前，各个国家都在大力开展这方面的工作。

在动力工程方面，最近正在研究建立大型超导线圈，用来作为贮能和电网的峰值负载补偿，以及发生故障时的供电。文献〔1-9〕和〔1-10〕已指出，利用超导线圈，看来比其他类型的蓄能器更为有利。在这方面正在进行概念设计研究。在文献〔1-10〕中描述了能量为 10^8 焦耳的超导贮能计划。许多国家已经制作了小型的超导贮能模型装置，并成功地进行了实验。此外还正在建造用作大功率短脉冲能源的超导贮能环。

可见，各种类型的超导磁体系统已广泛地深入到各个技术领域中（在这一方面，有详细的评论性文章，可参考文献〔1-11〕、〔1-12〕）。所以，如何确保这些系统可靠、无故障地运行，便成为一项极其重要的任务。

第二章 超导电性概论

2-1 概 述

众所周知，超导电性是以某些纯金属和合金处于电阻等于零这样一个特殊的物理状态而得名的；具有超导状态的物质称之为超导体。

当超导体被冷却到低于某一临界温度 T_c 时，就从具有有限电阻率的正常态过渡到超导态。临界温度 T_c 是磁感应强度 B 的函数，在 $B = 0$ 时， $T_c(B) = T_{c0}$ 。不同超导体的 T_c 值一般也不相同；已知超导体的临界温度处于从 0.012K（铌）到大约 20.5K（ Nb_3Al - Nb_3Ge 固溶体）的温度区间内●在临界温度附近，超导体的电阻从某一有限值急剧地减小到零。电阻等于零是超导态最重要的特性。

超导态的第二个基本特性是具有迈斯纳效应（the Meissner effect），即外磁场不能穿透处于超导态的超导体体内。因此，可以认为，处于超导态的超导体，其磁导率 μ 等于零；换言之，这样的导体是理想抗磁体。

外磁场在超导体的表面薄层内衰减到零。由超导体的宏观电动力学方程组（伦敦方程），给出磁感应强度在半无限空间（ $x > 0$ ）超导体内的分布^[2-1]：

$$B(x) = B(0)e^{-x/\lambda} \quad (2-1)$$

式中 x ——距超导体表面的垂直距离；

λ ——伦敦穿透深度。

● 至今所发现的超导体，临界温度最高的为 Nb_3Ge ， $T_{c0} = 23.2\text{K}$ 。——译者

按通常的电子密度, $\lambda \approx 10^{-6}$ 厘米; 某些超导体 (例如象 Nb-Zr 合金和金属间化合物 Nb_3Sn 、 V_3Ga), λ 达 2×10^{-5} 厘米。在超导体的表面层内, 流动着不衰减的超导电流, 它所产生的平均磁场刚好抵消了外磁场, 故外磁场不能穿透到超导体的深处。从麦克斯韦第一方程可以得出, 电流只能在 $\partial B / \partial x \neq 0$ 的超导体表面层内流动。

如果在处于超导态 (即 $T < T_c$) 的超导体上施加一足够强的外磁场, 超导电性就会被破坏, 即磁场穿透到超导体内部, 超导体过渡到正常态 (虽然 $T < T_c$)。超导体的温度愈低, 为破坏超导电性所需要的磁场愈高。该磁场称为临界磁场, 以临界磁感应强度 B_c 来表示。对大多数超导体, 其 B_c 随 T 近似地按抛物线规律变化, 可以用经验公式 (2-2) 很好地描述:

$$B_c(T) = B_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2-2)$$

式中 B_0 —— $T = 0$ 时的临界磁感应强度 (通过外推的方法确定)。

显然, 超导体的宏观状态唯一地由超导体的温度和外磁场值确定。图 2-1 给出了超导体的 B - T 关系。画有细线的区域相应于超导态, 曲线以上区域则为正常态。临界磁感应强度与温度的关系曲线相应于超导体从超导状态转变到正常态的几何点位置。

在样品表面的磁场达到临界值时, 超导电性就被破坏。这与磁场是外加的, 或是由沿着超导体流动的电流产生的, 还是由外磁场和超导体电流共同产生的均无关 (西耳斯比定则)。因为通常

● 在此, 临界磁场统一地由磁感应强度 B_c , 而不是用磁场强度 H_c 来定义。因为在大多数场合, 可以认为超导体是被非磁性介质所包围的, 所以这种替换是有条件的。

应该记住, 在某些场合下, 象由磁性物质包围的超导体, 转变并不是在磁性物质中达到临界磁感应强度时发生, 而是在达到临界磁场强度时才会发生。

$B_c(T)$ 值是不大的●，所以这类超导体不能通过很大的电流。当电流所产生的磁场超过了临界磁场时，则超导体就过渡到正常态。

大多数超导体，从超导态过渡到正常态是可逆的——这种过渡并不伴随任何不可逆的能量损耗。这是迈斯纳效应的直接结果，可以把超导态和正常态看成为两个相，并可用通常的热力学方法来分析转变的规律性^[2-2]。有磁场时，超导体从超导态向正常态的过渡在热力学上是可逆的，这种超导体称之为理想超导体。

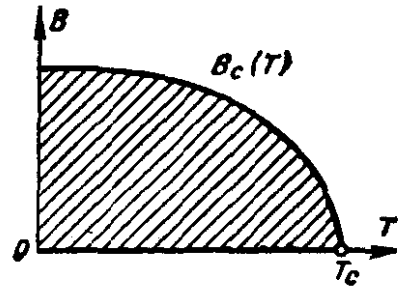


图2-1 超导体的 $B-T$ 图

1957年，巴丁、库珀和施瑞弗建立了超导微观理论，阐明了超导电性的本质^[2-3]。1956年库珀指出^[2-4]：在一定的条件下，通过自由的导电电子和导体晶格的声子发生相互作用可以产生电子的束缚态——库珀对。

由于这种相互作用而产生晶格离子电荷的涨落，对电子电场实现动态屏蔽。正电荷的涨落可以大到足以“过补偿”电子的库仑场（即“超过”电子间的库仑排斥作用），从而导致电子间的吸引，即形成电子对。在库珀对概念的基础上，建立了巴丁-库珀-施瑞弗理论。

库珀对具有整数的自旋。它与遵从费米-狄拉克统计的正常电子气体不同，而与任何有整数自旋的粒子一样，库珀对遵从玻色-爱因斯坦统计。费米气体是不能发生凝聚的，而非理想的玻色气体，随着温度的降低，可以过渡到一种特殊的状态。这种过渡可以解释为一种在动量空间中的凝聚。形成库珀对的同时，导

● 方程 (2-2) 中的常数 B_0 值，水银为 4.13×10^{-2} 特斯拉，锡为 3.045×10^{-2} 特斯拉，铅为 8.05×10^{-2} 特斯拉，铌为 2.69×10^{-2} 特斯拉，铝为 1.06×10^{-2} 特斯拉。

电子便“凝聚”到有序度更大的状态。

正如大家所熟知的那样，被凝聚的非理想玻色气体（例如 He I）具有超流动性。

按照巴丁-库珀-施瑞弗理论，超导电性可以看成是库珀对的超流动性。

根据金兹堡和朗道建立的唯一象理论，对超导现象作分析，得出了一些重要的结果^[2-5]。

从描述由超导态向正常态相变的热力学关系式得出：当超导体处于超导态时，它的熵小于正常态。因此超导相比正常相具有更高的内有序度。无须讨论超导状态的微观本质，只基于纯宏观的分析，利用某个有序度参量 ψ ，就可以进行超导电性的热力学描述。在金兹堡-朗道唯一象理论中，正是利用了朗道在建立他的第二类相变理论时所用的相类似的处理办法。

有序度参量 ψ 是这样引入的：当超导相和正常相处于热力学平衡时，有序度参量从超导体正常态区域内为零值变化到远离正常区的超导区域处为 1。根据巴丁-库珀-施瑞弗理论，可以认为，超导态是超导（即结合成库珀对的）电子和正常（即单个的）电子的混合物，参量 ψ 可以由混合物中超导电子所占的比例来定义。在巴丁-库珀-施瑞弗理论出现以前，超导电性的微观本质还是个谜的时候，在 1950 年建立的金兹堡-朗道理论中， ψ 被定义成一个参量，可以将超导体的自由能展开成 ψ 的级数。

金兹堡-朗道参量 κ 在金兹堡-朗道理论中起着最重要的作用。它有如下形式：

$$\kappa = \lambda(T) / \xi(T) \quad (2-3)$$

式中 $\lambda(T)$ ——伦敦穿透深度，可以令人满意地用一经验关系式描述：

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - (T/T_c)^4}} \quad (2-4)$$