

超導電的應用

上 册

王 其 俊 編

西北大學科研生產組印

一 九 七 八 年

前 言

超导技术是六十年代兴起的新技术，如今正在迅速的发展着。已用于很多尖端科学技术中，解决了很多现有的其他技术所不能解决的课题。现在世界各工业国家都相当的重视，投入了一定的人力和物力。每年发表的研究报告有一千多篇，其中三分之二是理论性的。按现在的发展，可以对超导技术的动向作如下的估计：

1. 已成为商品的小型强磁体及检测仪器，其性能将进一步的改善。20—30万高斯的小型强磁体及其他检测仪器将成为商品。大型磁体及其他超导元件将会更多的更有成效的用于一些国防、尖端科学及工业部门，在高频和微波领域中的应用将更为活跃，可以取代微波通讯中一些环节，在电力工业和交通运输方面，估计到八十年代会广泛应用，并引起电力工业的重大革新，有人认为，超导技术的战略目标是受控热核反应，而受控热核反应将基本上解决人类对能源的需要，这个问题可能在二十世纪末期解决。

2. 超导技术的应用需要深低温条件（液氮温度），已成为商品的氮液化器的性能会进一步的改善。新的微型氮液化器及大型氮液化器即将成为商品。低温设备和技术的发展将直接的促进超导技术的发展。

3. 对高温超导材料的研究会更加重视起来，将一些超导元件和装置的工作温度从液氮温度提高到液氦温度是有把握的，这会使超导装置的成本和运转费用降低很多，如果能够在高温超导材料上有新的重大突破的话，将会导致一次新的工业革命，但这

方迄今没有任何起色，看来，有可能提高到液氦温度(2.5K)。

4. 超导电的理论也会更加完善，一些现在还不能解释的现象会完满的加以解释；对超导材料及应用的研究工作，起着更显著的主导作用。

在党中央的领导下，我们国家在低温技术、超导电理论、材料及应用等方面有着一支不小的技术队伍，取得了不少的成果，并将要取得更大的成果。但是，与世界各工业国家相比，还有相当大的差距，造成这种差距的主要原因之一是四人帮对科学技术的干扰和破坏。

粉碎了四人帮，科学技术大解放。在英明领袖华主席为首的党中央领导下，一个向科学技术现代化进军的伟大革命群众运动正在迅猛兴起，我国的社会主义科学事业开始进入一个新的阶段。我国的超导电技术必将迅速发展，我们的社会主义祖国一定会在本世纪实现四个现代化。

为了响应党的号召，促进我国超导电技术的发展，我们决定编写这本《超导电的应用》。希望它在加速超导电技术的发展上起点作用。

在编写过程中，我们试图做到：取材较新、阐述得较全面较系统，并具有中等的深度。在超导电的理论方面，我们尽量地用初级理论来阐明，具有电磁学、理论物理、固体物理的一般知识的读者便可以阅读。本书侧重于超导电的应用，因此，我们将超导电的一般理论，超导电材料及超导电应用的概况汇集或第一章。在超导电应用方面，我们尽量多地介绍应用项目，使读者对超导电应用的全貌有一个了解。我们大体上按各种超导电装置的工作原理分类，并侧重应用的原理，而不过多地讨论技术细节。对已成熟的应用，介绍得细一些，对正在研究和探索的应用项目，则介绍得简单一些，同时也不可能谈细，这是因为这些是正在研究

着的东西，本身就不成熟；外国人严加保密，我们没有这种实践经验，对新型超导材料的探索和氦致冷技术的发展等与超导电应用技术的发展密切相关的内容放在附录中介绍。每章章末附有参考文献，供读者进一步研究使用。总之，我们企图在普及和提高的关系上、在理论和实践的结合上、在全面性和系统性上都处理得比较恰当些，同时，在取材上力求新一些，对这门技术的发展动向有所估计，使得它能够起到国外科技情报交流的作用。

我国的超导电工作者，作了相当多的工作，其中的一些还颇有水平。近三年相继召开的超导低温会议可以反映这个情况。但考虑到对国外保密，书中没有介绍国内情况，特别地回避了研究单位、研究课题、目前水平、技术数据、进一步规划等等。希望搞设计的同志，要首先了解国内的情况，吸取兄弟单位和同志们的经验。

这本书的出世，应当归功于党的领导，同时它也是集体智慧的结晶，两次超导低温会议我们学校都派代表参加了。通过会议，我们了解到许多情况，学习到很多东西，兄弟单位和同志们的一些成果我们吸取了，物理系资料室为我们提供了很多国外文献资料；物理系的各编领导组织专人审查和修改了全书书稿；科研生产组的领导组织了这本书的印刷和交流，等等。

但是，由于我们的思想水平和业务水平很低，书中一定有許多缺点和错误，恳切希望同志们批评指正，特别希望《超导和低温科技情报网》的单位及同志们批评指正，请将您的意见和意见寄给我们，通讯处是：西安市西北大学科研生产组

让我们携起手来，为我国超导电技术的发展，为了早日实现四个现代化，做出贡献。

王其俊

目 录

第一章	超导理论及应用概述	1
§ 1.1	一些电磁学知识	1
§ 1.2	第一类超导体	24
一	概述	24
二	理想导电性	28
三	完全逆磁性	27
四	磁屏蔽	29
五	临界磁场、磁化曲线	30
六	中间态	31
七	第一类超导体的热力学相变理论	33
八	二流体模型	36
九	磁通穿透	37
十	处在高频电场中的第一类超导体	39
十一	超导电性的物理图象	41
十二	磁通量子化	47
十三	伦敦矩	53
§ 1.3	第二类超导体	54
一	概述	54
二	超导薄膜的临界磁场	55
三	界石能	57
四	磁化特性 磁通涡旋线	60

五	布里顺磁性	67
六	表面超导电性	70
七	磁通流动	70
§ 1.4	硬超导体	75
一	概述	75
二	磁通钉扎	75
三	临界态 磁通蠕动	78
四	磁化曲线	81
五	临界态的计标	83
六	临界电流密度的测另	93
七	钉扎的机理和钉扎力的测另	97
§ 1.5	超导元素 合金及化合物	105
§ 1.6	超导电性的应用和发展	118
	参考文献	125
第二章	超导磁体	127
§ 2.1	稳定性问题	127
一	磁通跳跃	128
二	磁热不稳定性	132
三	天然稳定材料	136
四	绝热条件下的稳定性	139
五	复合导线	142
六	焯稳定法	147
七	冷冻稳定法	152
八	动态稳定法	157

九	机械稳定问题	164
十	磁通湮没	168
十一	磁体的退化和锻炼	169
十二	稳定性问题的研究动向	171
§ 2.2	超导磁体材料	171
§ 2.3	磁场的计标	177
§ 2.4	磁能和电磁力	180
§ 2.5	超导线的连接	181
§ 2.6	磁体的供电	183
§ 2.7	励磁伏安特性曲线	184
§ 2.8	磁体的保护	189
§ 2.9	超导磁体的一些应用	196
一	在核物理研究中的应用	201
二	受控热核聚变发电	212
三	超导储能装置	218
四	超导磁选技术	229
五	超导磁体在冶金、化工部门的可能应用	236
参考文献	238

第三章	超导体在电力工业中的应用	245
§ 3.1	硬超导体的低频交流损耗	245
§ 3.2	超导电机	267
一	超导交流电机	267

二	超导直流电机	286
三	超导电机的优点和应用	293
§ 3.3	磁流体发电机	297
§ 3.4	超导电力传输电缆	304
§ 3.5	超导变压器	315
	参考文献	320

第四章 超导磁体在航空及水陆交通运输中的应用 327

§ 4.1	磁力悬浮	327
§ 4.2	超导磁悬浮列车	329
§ 4.3	船舶电磁推进装置	332
§ 4.4	超导磁体在航空中的应用	333
	参考文献	335

第五章 逆磁性和磁通流动的应用 337

§ 5.1	磁屏蔽、磁通捕获	337
§ 5.2	利用逆磁性的悬浮装置	343
一	超导重力仪	343
二	无摩擦轴承	347
三	陀螺仪	348
§ 5.3	直流变压器	351
§ 5.4	磁通泵	353
	参考文献	363

第六章	超导态和常导态转变的应用	365
§ 6.1	概述	365
§ 6.2	冷子管、同磁管及由它们组成的计算机元件	366
§ 6.3	交叉膜冷子管放大口	377
§ 6.4	红外辐射强度仪	385
§ 6.5	微波混频口、直流放大口、参量放大口	387
§ 6.6	液氮乙测号仪	394
§ 6.7	超导开关及超导整流口	396
参考文献		398
第七章	第一类超导体的高频应用	401
§ 7.1	高频表面电阻和剩余电阻	401
§ 7.2	超导微波谐振腔、超导直线加速口	406
§ 7.3	在微波通讯中的应用	415
一	传输线	415
二	延迟线	422
三	天线	424
四	超导滤波口和调谐口	424
五	振荡口	427
六	放大口	427
参考文献		428

第八章	正常电子隧边效应的应用	431
§ 8.1	正常电子隧边效应	431
§ 8.2	在研究超导体性质中的应用	438
§ 8.3	在微波元件上的应用	441

参考文献		457
------	--	-----

第九章	电子对隧边效应的应用	463
§ 9.1	电子对隧边效应	463
§ 9.2	隧边结的制作	474
§ 9.3	开关元件和记忆元件	484
§ 9.4	磁强计、电压表及其他电测仪表	486
§ 9.5	电子对隧边效应在微波领域中的应用	505
一	微波发生口	505
二	微波能量检测口	506
三	混频	509
四	变频	514
五	频率分析	515
六	参量放大	519
七	全超导超外差接收机	521
八	测参射频衰减口的衰减系数	523
§ 9.6	测定 $\frac{e}{h}$ 电压基准	525
§ 9.7	温度计	528
附录一	新型超导材料的探索	535
附录二	氦致冷技术的发展	563
展望未来	一代结束语	

第一章 超导电的理论和应用概述

§ 1.1 一些基础的电磁学知识

在超导电现象的理论分析中，要用到电磁学的知识。为了使缺乏这些知识的读者对超导电理论有进一步的了解，我们在此将有关的概括的介绍一下。

电磁学之间的关系式与我们所选用的单位制有关，在文献资料中使用着绝对静电单位制 (CGSE)、绝对电磁单位制 (CGSM)、高斯单位制 (又称为混合单位制) 及有理化实用单位制 (MKSA)。前二种单位制在理论上各有缺点，而且和工程上实际应用的单位不同，高斯单位制克服了这二种单位制理论上的缺点，在物理文献中用得比较多，但仍与工程上实际应用的单位不同，MKSA 单位制没有以上缺点，有较大的优越性，已普遍地应用在工程技术中，现代物理学文献中也日益采用，因此，本书采用 MKSA 单位制。为了便于阅读其他文献，我们将电磁学在各个单位制中的换算及公式列于表 1.1.1 和表 1.1.2。(见第 20-21 页)。

在 MKSA 单位制中，其基本量是长度、质量、时间和电流强度，它们的基本单位是米，千克，秒，安培，其他物理量是导出量。

一、静电学

1. 库仑定律

实践证明，带电物体之间存在着相互作用力，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引。作用力的大小决定于：带电体的电量，相互间的距离、带电体的尺寸、形状及其周围介质的性质，情况是很复杂的，为了研究电荷间相互作用的最基本规律，我们讨论以下简单情况：带电体在真空中，周围没有介质，而且带电体的

几何尺寸与带电体之间的距离相比，小到可以忽略不计，带电体可以认为是一个点电荷。在这样的情况下，二个带电体分别是 q_1 和 q_2 的点电荷之间的相互作用力的方向沿着这二个点电荷的连线，作用力的大小与电荷 q_1 和 q_2 的乘积成正比，而与这二个点电荷之间的距离 r 的平方成反比，即

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.1.1)$$

称为库仑定律，式中 q 的单位是库仑， r 的单位是米， f 的单位是牛顿， ϵ_0 为一常数，叫做真空的介电系数，

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{库仑}^2}{\text{牛顿} \cdot \text{米}^2} \quad (1.1.2)$$

2. 电场强度

现代物理学证明，电荷间的作用力不是直接施给的，而是在电荷所在处的周围空间，有一种叫做电场的特殊物质存在着，电荷间的作用就是通过和电荷相联系的电场来实现的。

相对于观察者为静止的电荷周围存在的场称为静电场。静电场的重要表现有二：引入电场中的任何带电体都将受到电场作用的力；带电体在电场中移动时，电场作用的力将对带电体做功。这表示电场具有能量。

为了研究电场的第一个表现，常常利用试验电荷 q_0 。（试验电荷是一个带电量很小的点电荷，它的引入不影响原来电场情况）。把 q_0 放在带电体 Q 所形成的电场中不同地点，我们发现， q_0 所受的力的大小和方向是随点不同的，但在电场中一给定点处， q_0 所受的力的大小和方向却是完全一定的，如果在电场中某给定点处我们改变试验电荷 q_0 的数值，则 q_0 所受的力的方向仍然不变，但力的大小在改变，当 q_0 取各种不同数值时，所受力 f 的数值与相应的 q_0 的数值的比 $\frac{f}{q_0}$ 却具有确定的数值，由此可见，比值

$\frac{f}{q_0}$ 以及 f 的方向只与试验电荷 q_0 所在点的电场性质有关，而与试验电荷无关。因此，我们把比值 $\frac{f}{q_0}$ 和 f 的方向作为描述静电场中给定点的客观性质的物理量，称为电场强度，电场强度是矢量，用 E 来表示，

$$\vec{E} = \frac{\vec{f}}{q_0} \quad (1.1.3)$$

这就是说，电场中某点的电场强度在数值上和方向上等于放在该点的单位正电荷所受的力。

电场强度的单位是 牛顿/库仑，以后会看到，这个单位又可写作 伏特/米，这是实际中更经常的写法。

3. 电力线

为了形象的了解电场分布，通常引入电力线的概念，电力线是人为的画出的这样的一些曲线族：使得曲线上任何一点的切线方向都跟该点的电场强度的方向一致，这样做出的曲线叫做电场的电力线。

为了使得电力线还能够表示出各点电场强度的大小分布，我们引入电力线密度的概念，在电场中任一点取一小面积元 ΔS ，与该点场强方向垂直，没穿过 ΔS 的电力线有 ΔN 条，则比值 $\frac{\Delta N}{\Delta S}$ 叫做该点电力线密度。它的意义是，通过该点单位垂直截面积的电力线条数。在做电力线图时，我们总是使电场中任一点的电力线密度与该点的电场强度的大小成正比。这样，电力线稀疏的地方表示电场强度小，电力线稠密的地方表示场强大。

4. 电位 电位差

电位是描写电场对电荷具有做功本领的物理量。

实践表明，当电荷在静电场中移动时，电场对电荷的作用力（称电场力）所作的功和电荷移动时的路径无关，而仅由电荷电量（称电荷量）的大小和电荷的始末位置所决定，因此在描述静电场的这一性

4

质时，可以引入电位能的概念，电场力所做的功就是电位能变化的量度。

$$A_{ab} = W_a - W_b \quad (1.1.4)$$

电位能是一个相对的量，为了说明电荷 q 在电场中某一点势能的大小，必须有一个作为参考的另标准，通常我们规定电荷 q 在无限远处的电位能为0，这样一来，将电荷 q 从电场中的 a 点移到无限远，电场力所做的功 $A_{a\infty}$ 即为 a 点的电位能 W_a

$$W_a = A_{a\infty} = q \int_a^{\infty} E \cos\theta dl = q \int_a^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.1.5)$$

式中 θ 为 E 的方向和电荷沿任意路径移动的方向的夹角

可以证明，电位能 W_a 与 q 成正比，而比值 $\frac{W_a}{q}$ 却与 q 无关，只决定了电场的性质以及场中给定点 a 的位置，所以这一比值是表征静电场中给定点电场性质的物理量，称为电位，用 U_a 表示 a 点的电位，

$$U_a = \frac{W_a}{q} = \frac{A_{a\infty}}{q} = \int_a^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.1.6)$$

这就是说，电场中某点的电位在数值上等于放在该点处的单位正电荷的电位能，也等于单位正电荷从该点经过任意路径到无限远时，电场力所作的功。

在静电场中，任意二点 a 和 b 的电位之差称为电势差，也叫作 a 、 b 二点的电压。

电位和电压的单位是焦耳/库仑或伏特。1伏特 = 1焦耳/库仑。

5. 电场强度和电位的关系

电场强度和电位都是用来描述电场中各点性质的物理量，对电场中某给定点来说，其间必然有着确定的关系，

在均匀场中，将正电荷 q 沿电力线方向从 a 点移动到 b 点，

电场力所做的功为

$$A_{ab} = \int E l,$$

l 为 a 、 b 二点之间的距离，另外，电场力的功等于电位能的变化量，即

$$A_{ab} = \int (U_a - U_b) = \int V_{ab}$$

由以上二式可得

$$E = \frac{U_a - U_b}{l} = - \frac{\Delta V}{l}$$

$\Delta V = U_b - U_a$ 为电位增量。

在非均匀电场中，一般说沿电场方向任意两点 a 和 b 的电场强度不相等，但若 a 、 b 相距很近， $ab = \Delta n$ 足够小，使得在 Δn 内电场强度可以认为是均匀的，并设 a 点的电场强度为 \vec{E} ，于是按上式的推论，并取极限，则得

$$E = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{U_a - U_b}{\Delta n} = - \frac{dU}{dn} \quad (1.1.7)$$

即电场中任一点的电场强度在数值上等于沿电场方向电位的变化率（称做电位梯度），式中负号表示电场强度的方向指向电位降落的方向。

将 (1.1.7) 式改写成矢量形式，则得

$$\vec{E} = -\nabla U \quad (1.1.8)$$

6. 电介质极化强度

电介质是指那些不导电或基本上不导电的物质，所以也叫绝缘体，电介质的特征是：电子不能在介质内自由移动，这是因为电介质中的电子和原子核之间有相当大的吸引力。这个力束缚着电子使电子不能离开原子或分子而自由运动。

为了认识电介质的性质，需要引进电偶极子的概念，两个大小相等，符号相反的电荷 $+q$ 和 $-q$ ，它们间的距离为 l ， l 一般很小，通常称这样的一对电荷总体为电偶极子，电荷 q 和距离 l 的乘积 $p = ql$ 称为电偶极子的电矩。

电介质分二类，有极分子和无极分子，无极分子的特征是，轨道电子对称地分布在原子核周围，每个分子的正电荷中心和负电荷中心按时间平均来说是相重合的，因而对外不表现电性，有极分子的特征是每个分子的正电荷中心和负电荷中心不相重合，相当于一具有一定电距的电偶极子，外电场不存在时，由于这种电介质分子的排列是乱七八糟的，它们的电作用互相抵消，因而和无极分子的电介质一样，对外也不表现电性。

当把电介质放在外电场中时，如果电介质是由有极分子组成的，这些分子受到电场力的力矩作用，促使它们要沿电场方向有规则的排列。电场愈强，排列得愈整齐。如果电介质是由无极分子组成的，分子中的电子也会逆着电场方向略有移动，使得正负电荷中心不再重合，这相当于一个电偶极子。电场愈强，这种移动也愈大，因此，电介质在电场中都会对外表现电性，这种现象叫做电介质的极化现象，由极化现象而出现的电荷叫做束缚电荷。

束缚电荷在介质内 P 的相互作用相互抵消，而在电介质表面上出现等量异号的电荷，这些电荷也要产生电场，于是，电介质中的点电场强度 \vec{E} 应是外电场强度 \vec{E}_0 和束缚电荷的电场强度 \vec{E}' 的矢量和，即

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \quad (1.1.9)$$

因为 \vec{E}' 的方向与 \vec{E}_0 的方向相反，故介质内 P 的点场强比没有介质时的场强要小。

为了定量的描述极化现象，需要引入极化强度，它表示当电

介质处于极化状态时，单位体积的电介质中的分子的电矩的矢量和，即

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_e}{\Delta \tau} \quad (1.1.10)$$

\vec{P} 的单位是 库仑/米²。 $\sum \vec{p}_e$ 为体积 $\Delta \tau$ 的电介质中的总电矩。

极化强度 \vec{P} 与外加电场有关，或者说 \vec{P} 和总电场强度 \vec{E} 有关，在各向同性的介质内它们之间的关系式为

$$\vec{P} = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 \vec{E} = \chi_e \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.1.11)$$

式中 $\chi_e = \epsilon_r - 1$ 称为电极化率， ϵ_r 称为相对介电系数， ϵ_r 是一个标量，对于真空， $\epsilon_r = 1$ 。

7. 电位移强度

由 (1.1.9) 和 (1.1.11) 式可知，电介质的极化状态由总电场强度决定，但总电场强度又有赖于介质极化状况，两者互相影响、互相制约，这使得我们在有介质时定号解决电场变得复杂化了。

为了避免束缚电荷的影响而方便的解决问题，需要引入电位移强度 \vec{D} ， \vec{D} 的定义是：

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.1.12)$$

\vec{D} 的单位和 \vec{P} 相同，亦即是 库仑/米²

如果电介质是各向同性的，则由 (1.1.11) 和 (1.1.12) 式，可以得到，

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.1.13)$$

式中 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 。

对于真空， $\epsilon_r = 1$ ，所以 $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$

如果电介质是各向异性的，(1.1.11) 和 (1.1.13) 式不成立，但 (1.1.12) 式是 \vec{D} 的定义，仍然成立。

二、直流电