

超導電的应用

下 册

王 其 俊 编

西北大学科研生产组印

一 九 七 八 年

超导电的应用 (下册) 目录

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、超导管以及由它们组成的计算机元件	366
§ 6.3 交叉膜冷子管放大器	377
§ 6.4 红外辐射强度仪	385
§ 6.5 微波混频器、直流放大器、参量放大器	387
§ 6.6 液氦示波器	394
§ 6.7 超导开关及超导整流器	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、超导直线加速器	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	423
四、超导滤波器和调谐器	424
五、振荡器	427
六、放大器	427
参考文献	428
第八章 正常电子隧结效应的应用	431
§ 8.1 正常电子隧结效应	431
§ 8.2 正常电子隧结效应在研究超导体性质中的应用	438
§ 8.3 正常电子隧结效应器件方面的应用	441
参考文献	457
第九章 电子对隧结效应的应用	463
§ 9.1 电子对隧结效应	463
§ 9.2 隧结的制作	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 电子对隧结效应在微波领域中的应用	505
一、微波发生器	505
二、微波能量检测器	506
三、混频	509
四、变频	514
五、频率分析	515
六、参量放大	517
七、全超导超外差接收机	521
八、测频射频衰减器的衰减系数	523
§ 9.6 测度 $\frac{e}{h}$ 、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 液氮制冷技术的发展	563
展望未来——代结束语	587

第四章 超导磁体在航空及水陆交通运输中的应用

§ 4.1 磁力悬浮

我们知道，一段载流导线，放在磁场中，该导线将受到一个作用力，叫安培力。一个载流线圈放在均匀磁场中将受到一个力矩，而放在非均匀磁场中，将受到一个力和一个力矩。

如果磁场分布具有轴对称性，而载流线圈是元环形的，并安放在对称轴上，则该元形线圈的受力情况⁽¹⁾，如图 4.1.1 所示，

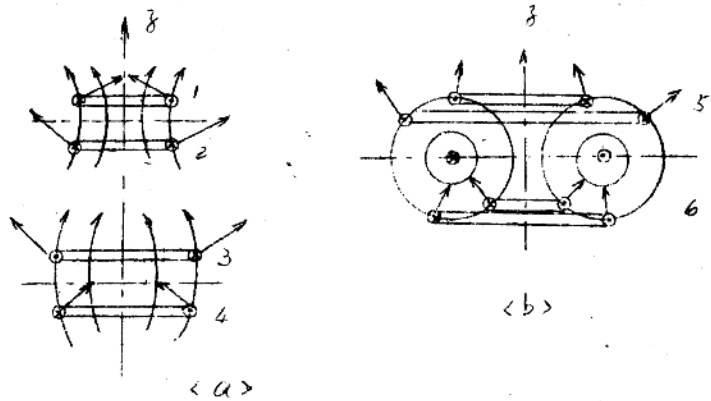


图 4.1.1

<a> z 方向的磁场较强

 z 方向的磁场较弱

当线圈所受的电磁力与线圈的重力相平衡时，线圈将处于力的平衡状态，这种平衡有的是稳定平衡，有的是不稳定平衡，如表 4.1.1 所示。稳定平衡是指当载流线圈沿某一方向偏离平衡位置时，线圈将受到一个回复力，使它重新回到平衡位置。不稳定平衡是指当线圈沿某一方向偏离平衡位置时，线圈上没有回复力，而是受到一个使线圈越加偏离平衡位置的力，从而使线圈越加运

动起来。

表 4.1.1

偏离方向	情况1	情况2	情况3	情况4	情况5	情况6
当线圈偏离平衡位置而向上或向下偏离时	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定
当线圈的轴线与磁场的对称轴有一水平方向偏移时	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定
当线圈的轴线与磁场的对称轴有一夹角时	不稳定	稳定	当磁力线的曲率半径大于(小于)线圈的半径时是稳定的(不稳定的)	当磁力线的曲率半径小于(大于)线圈的半径时是不稳定的(稳定的)	不稳定	稳定

由表 4.1.1 可知,为了使线圈稳定的悬浮起来,必须对其不稳定方向进行控制。情况 1 和 5 有着 2 个方向的不稳定性,没有实用价值,情况 3 当线圈的半径大于磁力线的曲率半径时,仅有着垂直方向的不稳定性,为了使垂直方向具有稳定性,可以采用一维的控制系统,在这个控制系统内,传感四测另线圈的垂直位置,当线圈偏离平衡位置时,传感四输出失衡讯号,此讯号调套磁场使线圈回到平衡位置,失衡讯号为 0 时为止。情况 2、4 和 6 仅有着水平方向的不稳定性,为此需要 X 方向和 Y 方向的二维控制系统,这三种情况对于很多实际应用已足够了。

情况 6 已用于受控热核聚变反应的研究中^(1,2),在此用的是超导线圈,超导材料是 Nb-Zr 合金(含 Nb 25%),线圈的直径为 20 吋,其截面积是方形的,边长 0.86 吋,共 3310 匝,线圈的自感为 10 亨(计算值),其中的电流为 16 安,这个线

圈连同杜瓦容器一起被稳定的悬浮着。使用超导线圈的好处是：可以工作在永久状态，电流不衰减，对实验结果的分析容易。反之，若用常导线圈，其中的电流随时间而衰减，从而产生变化的磁场及电场，此电场会使实验结果复杂化。

此外，我们在前节 § 2.9 节受控热核聚变发电的研究中还介绍了几种磁悬浮式结构。〈3-7〉

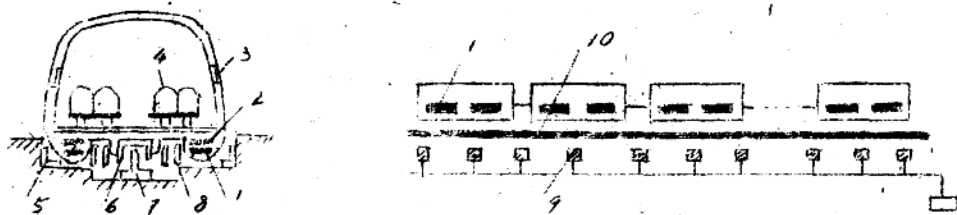
§ 4.2 超导磁悬浮列车

近几年，日本、美国、加拿大、西德等国在超导磁悬浮列车的研究上，投的力比较大，进展也很快〈8〉。估计超导电在工业上应用的最早项目之一。这种磁悬浮列车的工作原理如下。〈9〉

在列车的底下安装着超导磁体，在轨道上铺设一些闭合的铝环，当列车在线性同步电机的驱动力下运动时，列车上的磁体的磁力线与闭合铝环相连接，在铝环中感应出大的电流。由于铝环不是超导的，铝环内的电流将衰减，但是，当列车的运动速度足够快（大于120公里/小时）时，磁体所在位置处的铝环中的电流还来不及明显地衰减。由于磁场和电流之间的相互作用，产生一个向上的作用力，亦即使列车升起的举力。当举力大于列车的自重时，列车就被悬浮起来。列车停止时，环内无感应电流，故在开车和停车时仍需车轮。图 4.2.1 示出磁悬浮列车的示意图。

为了实现这种列车，日、美、西德等国正大力进行铝环和磁体的相互作用所产生的电磁力的大小、稳定性、集电、控制、推进等基础理论研究和实验。文献〈10〉中报导了一些理论和实验结果，如图 4.2.2 所示，在此，使用了两个矩形线圈，此线圈安放在一个运动的铝板上，离铝板一个确定的距离处，当速度为 0 时，没有举力（ F_L ），当速度增加时，举力迅速地增加，除了举力外，还同时存在一个阻力（ F_D ），此阻力在低速度时取最大值。

而当速度增加时，此阻力单调地减少。



(a) 横截面

(b) 纵截面

图 4.2.1 磁悬浮列车示意图

- 1.超导磁体 2.液氮容器 3.车窗 4.座椅 5.地上线圈 6.用于驱动的线性同步电机
7.用于驱动的轨道 8.起及停车时的车轮 9.推进装置线性直线电机 10.车板

线圈在轨边平石上的高度并不是恒定不变的，这是因为：列车起动时受到一个举力、受到瞬变的空气动力负荷以及轨边的不规则性。若线圈工作在持久电流状态，则线圈力图产生一个不变化的磁通链。以上扰动及线圈高度的变化将改变着线圈和轨边的耦合系数，从而影响着线圈中的电流。图 4.2.3 示出线圈中的电流、列车的高度和速度之间的关系。由图可知，在某一速度以前，线圈不能产生足够的举力使列车悬浮，在悬浮起来以前，线圈中的电流随着速度的增加而增加。当悬浮起来以后，电流减少，这是因为列车和轨边之间的距离加大的缘故。悬浮时的电流数值对于超导磁体的设计是特别重要的，它必须小于线圈的临界电流。

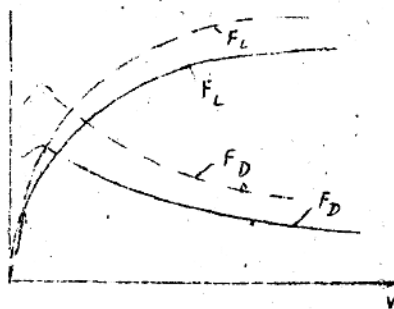


图 4.2.2 举力 F_L 、阻力 F_D 与速度 V 的关系
实线为实验结果，虚线为理论值

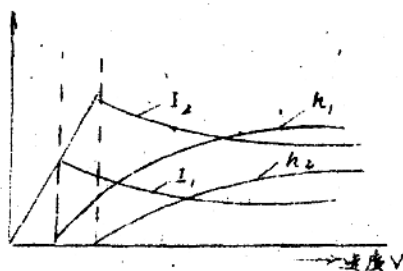


图 4.2.3 线圈中的电流 I 线圈在轨边上的高度 h 与速度 V 的关系 脚码 1 和 2 分别表示弱悬浮线圈和强悬浮线圈

日本在磁悬浮列车的研究方面的进展特别快，1972年已制成由四人乘坐的模型车，铺设着七公里长的试验轨道。1974年国际超导电应用会议上，日本人放映了一P彩色电影，内容是超导体磁悬浮列车系统的大尺寸模型已运转成功。他们的计划是：在东京和大阪之间实现每小时550公里的高速度运转，列车能够挂造的车厢数目为16节，最大加速度为每秒3公里/小时，最大减速度在一般刹车时为5公里/小时秒，紧急刹车时为10公里/小时秒，有效悬浮高度为250毫米，轨道的公差为每10米内 ± 10 毫米，每节车厢内装八个超导体，用作支撑系统，用直线同步电机拖动二吨重的车辆，再用直线感应电机拖动3.5吨的车辆，这项工程正在高速度的进展，估计1980年完工。

相比之下，美国的工作和加拿大的工作在规模上是较小的，这反映北美对磁悬浮列车计划的迫切性比日本小得多，因为北美的铁路运轨不像日本那样紧张。美国运轨下发起的福特计划只考虑超导体方案，在中国湖进行的试验是用火箭做推进系统，加拿大的计划包括系统的设计最佳化和实验室试验，这种系统是推进、悬浮和导引三者结合为一体的系统，这样一来，一组磁体线圈就可承担双重任务。

德国也在研究超导体用于磁悬浮和导向高速列车，超导体安装在列车里，列车用线性马达牵引(11.12)，沿铝轨前进，采用两种不同超导线圈(采用本征稳定的NbTi-铜基扭缠复合导线)结构的实验已经完成，结果与理论上的研究差不多(13)，在实验中，用坚实的铝盘作轨道，铝盘直径为1.5米及1.0米，轨道和线圈之间的相对运动是通过把铝盘相对于线圈旋转来模拟的，线圈固定不动，铝盘的最大圆周速度为200公里/小时，正在筹建一个铝盘直径为6米的模型，正在拟这一个重量为10吨的实验列车计划。

§ 4.3 船舶电磁推进装置 (14)

船舶电磁推进装置是一种新型的推进装置和通常的螺旋桨推进器相比较，电磁推进装置有着以下优点：1. 不产生涡流，可以使船只的速度加快，并且效率很高；2. 没有电动机及螺旋桨等机械转动部分，故噪音低，震动小，作潜水航行时不易被发现；3. 因为没有螺旋桨，所以不需要海水密封装置，电磁推进装置的这些优点，引起了美国海军系统的极大重视。图 4.3.1 所示的是它的原理，在船体内安装着超导磁体，在船体外的海水

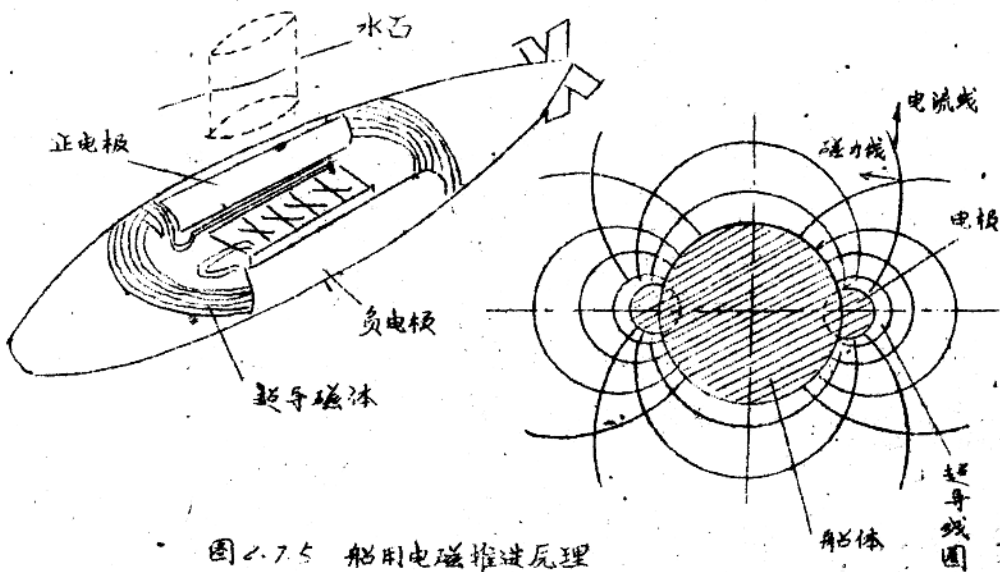


图 4.3.1 船用电磁推进原理

中散布着磁力线，同时在船体侧边装着电极，使在海水中流过电流，在海水中，电流和磁力线发生相互作用，将海水推往船的后方，同时对船体产生一个强大的推动力。

由于海水的导电能力比较低，故为了产生强大的推进力，便需要在较大空间内获得 50~200 千高斯的强磁场。

美国正在研究电磁推进的汗水油轮，打算采用 7 万高斯的超

导磁体，船内动力取自船用原子核反应堆，该油轮是10万吨级的，时速30哩，推进效率为86%，于是这种油轮的推进动力为5万匹。

§ 4.4 超导磁体在航空中的应用

一、风洞实验⁽¹⁵⁾

通常的风洞实验是用支撑架将实验模型支起来，由于存在支撑系统，气流将受到它们的扰动，从而使得实验结果不能正确地反映出空间运行的实际状况。为了更真实地进行模拟，美国人研制了一个悬浮系统。在这个悬浮系统里，使用了超导磁体。实验模型中钻了一个小铁球，整个模型放在超音速 ($M=3$) 风洞中，如图4.4.1所示，在磁力的作用下，模型悬浮在风洞中。共使用了三组磁体。它们的功用如下：主磁场线圈用来使小铁球磁化；与风洞轴线成 $\tan^{-1}\sqrt{8}$ 角度的三对线圈（图中仅划了一对）用来在模型中产生三个相互垂直的力；调查线圈用来平衡作用在模型上的阻力。主磁场线圈和调查线圈由直流供电，三对 $\tan^{-1}\sqrt{8}$ 线圈由交流供电。

二、高速火箭发射

由于空气动力学上的发热，火箭导板和轨边间的接触造成剧烈震动，以及导板对轨边造成的损坏，使得火箭导板在轨边上的速度限制在1500米/秒以下。

为了提高这个速度，有人打算用超导磁体将火箭悬浮起来。而为了减少空气动力学发热，火箭放在真空隧边里，并且在真空隧边里运动，据统计，速度可以提高到5000米/秒，图4.2.2示出超导磁体悬浮火箭弹射系统的示意图。

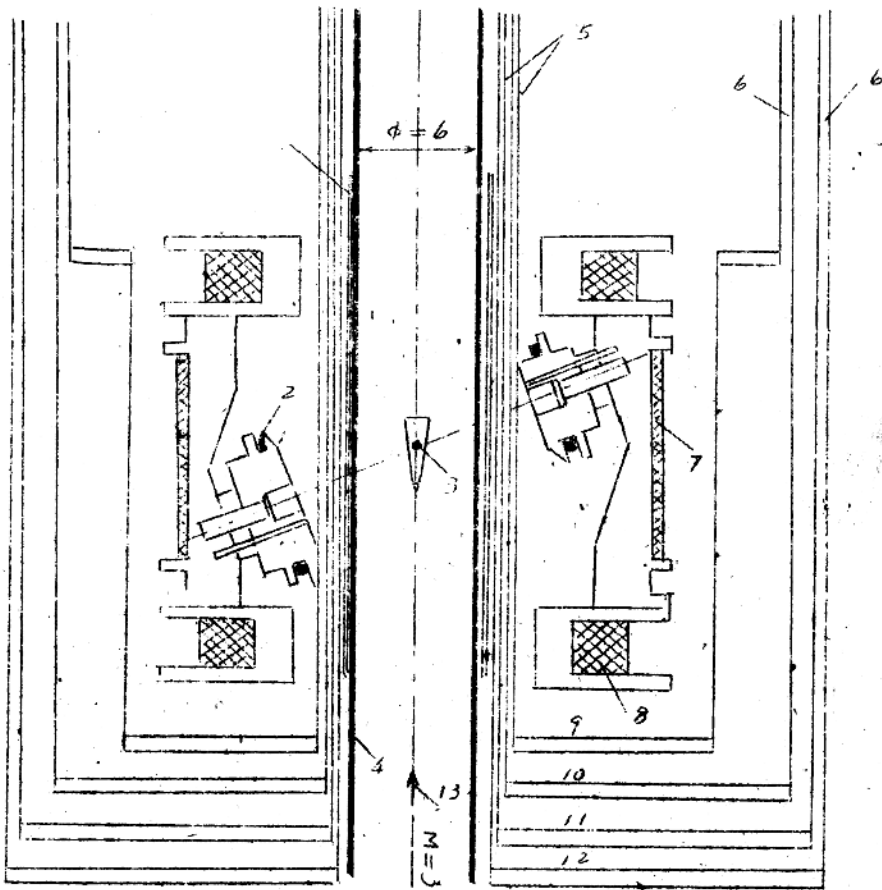


图 4.4.1 风洞实验

- 1. 位置传感线圈
- 2. tg^{-1} 线圈
- 3. 铁球
- 4. 风洞壁
- 5. 纤维波功板
- 6. 不锈钢板
- 7. 主磁场线圈
- 8. 调在线圈
- 9. 液氮
- 10. 真空
- 11. 液氮
- 12. 真空
- 13. 气流

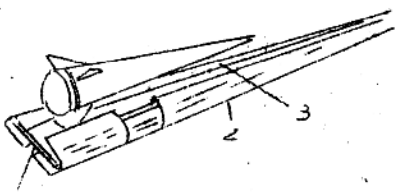


图 4.4.2 超导磁体悬浮火箭弹射系统

- 1. 超导线圈, $2\text{m} \times 6\text{m}, 2 \times 10^5$ 安培匝;
- 2. 用混凝土加固的薄铝导轨
- 3. 防震架。

三、飞船屏蔽

在宇宙飞船上，利用超导磁体的强磁场，使高能辐射粒子转向，从而可以避免高能辐射损伤，这对宇宙飞行员的安全及飞船中仪器的正常工作都是重要的。

据报道，美国空军已准备采用强超导磁体的辐射屏蔽装置。

利用超导强磁体的磁场捕获等离子体，以代替厚的辐射吸收墙，可以大大减轻飞船外壳的烧蚀。

第四章 参考文献

1. J. File et al. J. Appl. phys. V.39 p.2623 (1968)
2. J. File et al J. APPL. phys. V.42 p.6 (1971)
3. D.N. Cornish 3rd Int. conf. magnet Technology Hamburg 1970.
4. D.N. Cornish 6th Symposium on fusion Technology, Aachen, September 1970. 133
5. J. File Symposium on Eng. problem in fusion Research Los Alamos. April 1969.
6. K.E. Wakefield 6th Symposium on fusion Technology, Aachen, September 1970. 141
7. C.E. Taylor et. al IEEE Trans Nuclear Sci. NS-18 (1971) 69
8. J.T. Harding 17th Annual conf. on magnetism and materials. Chicago III NOV. 1971.
9. J.R. Powell et. al. ASME paper 66-WA/RR-5 1966

10. J.R. Reitz, 1972 Appl Supercond. Conf.
Annapolis Md, May, 1972.
11. J.R. Powell et al "magnetic suspension
for levitated tracked vehicles" cryogenics
P.192-204 June, 1971.
12. C. Guderjahn et al, "Magnetically levitated
transportation" cryogenics p.171-179
June, 1971.
13. G. Bogner et al preliminary results on a
electrodynamically levitated super-
conducting coil proc. of the second Int.
Sym. on electro-magnetic suspension,
Southampton, England, 12-14 July, M.
I + M, 8, 1971.
14. 冷冻 (日) NO. 513, 1970, p78-86
15. R.N. Zapata et al, J. Appl. phys., V. 42, P.3
(1971)

第五章 逆磁性和磁通流动的应用

§ 5.1 磁屏蔽、磁通捕获

一、磁屏蔽

如第一章所述，取一个由第一类（或第二类）超导体做成的空心元球，降低温度，使其在没有磁场的条件下转入超导态。然后再加上磁场，若磁场小于该超导体的临界磁场 H_c （或第二类超导体的下临界磁场 H_{c1} ），由于在超导球体表面层内产生了表面电流，它的磁场刚好等于外磁场，故超导球壳及空腔内的磁场为 0，只要超导状态不被破坏，空腔中的磁场永远为 0。这样的现象叫做磁屏蔽。利用磁屏蔽现象，可以使得我们的工件或仪口免受外磁场的干扰，为此，只要将工件或仪口用超导体包围起来便可以了。另一方面，也可以用这种办法，使得某一工件或仪口的磁场不影响外界的其他工件或仪口。

但是由于第一类（和第二类）超导体的临界磁场（或下临界磁场）太小，仅几百高斯，故仅能用未屏蔽小的外磁场，其应用范围太窄。

为了解决强磁场的屏蔽问题，必须使用硬超导体。现在我们讨论硬超导体对磁场的屏蔽作用，首先考虑一个无限长无限宽而厚度为 d 的平板，处在均匀地外磁场 H_e 中，磁场平行于板面，如图 5.1.1，由 § 1.4 节所述的临界态模型，平板内的磁场是逐渐减少的，因而就存

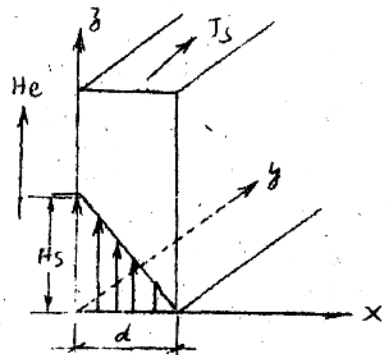


图 5.1.1

在一个沿 y 方向的超导体电流，此超导电流密度 J_S 数值上就等于临界电流密度 J_C ，即 $J_S = \pm J_C$ 。 J_S 对磁场有屏蔽作用，叫做宏观的屏蔽电流密度，按比思模型， $J_C = \text{常数}$ ，于是可得平板的磁场分布为

$$B = \mu_0 H_e - \mu_0 J x \quad (5.1.1)$$

按磁屏蔽的要求，平板的右侧，亦即 $x \geq d$ 的区域没有磁场，这样一来，我们由上式得到能够屏蔽的最大磁场 H_S 和平板厚度的关系。

$$H_S = J_C \cdot d \quad \text{或} \quad d = H_S / J_C \quad (5.1.2)$$

按 (5.1.2) 式，似乎是只要平板厚度足够大，就可以屏蔽住任何高的外磁场。其实不然。这是因为硬超导体内常常发生磁通跳跃而引起超导性的破坏，从而失去磁屏蔽能力，按绝热条件下的稳定性判据，即 § 2.1 节的 (2.1.29) 式，并注意到式中的 δ 等于 $d = H_S / J_S$ ，则得稳定条件为

$$H_S < H_{FJ}, \quad H_{FJ} = \sqrt{3cT/\mu_0} \quad (5.1.3)$$

而

$$T = -J_C / \frac{dJ_C}{dT}$$

式中 H_{FJ} 叫作磁通跳跃场强，因为外磁场 H_e 超过它就会发生磁通跳跃， c 为超导平板材料的比热， T 称作特征温度，例如 $c = 10^{-3}$ 焦耳/厘米³度， $T = 10\text{K}$ ，则 $H_{FJ} = 2 \times 10^3$ 高斯。

将 (5.1.3) 式代入 (5.1.2) 式，则得

$$d < \frac{1}{J_C} \sqrt{3cT/\mu_0} \quad (5.1.4)$$

此式表明，对某一超导体而言，其屏蔽磁场的能力是有限的，太大的厚度是无用的。

实际问题更为复杂，公式 (5.1.3) 是个近似准则，因为它没有涉及外磁场随时间的变化速率 dH/dt 。而 dH/dt 的大小与

屏蔽能力密切相关。一般的说，当 dH/dt 较小时，超导体内的热扩散速度大于磁扩散过程，可以把过程看作是等温过程，磁屏蔽能力就比较大。当 dH/dt 较大时，超导体内的磁扩散速度大于热扩散速度，此时的过程近似于绝热过程，磁屏蔽能力就比较小。

以上讨论可以概括为，对于超导材料来说，磁屏蔽能力主要与下列因素有关：(1) 材料的特征温度 T 越大越好，即 T_c 越大， dT_c/dT 越小就越好；(2) 材料的比热 c 越大越好。

所以，采用高临界温度 T_c 、高临界电流密度 J_c 、高临界磁场的超导材料，和多孔性烧结材料（渗入液氦后，比热增大）比较有利。

其次，我们考虑一个超导材料做成的圆筒，放在外磁场中，外磁场的方向平行于圆筒轴线，如图 5.1.2 所示。这时感应出来的宏观屏蔽电流沿圆筒壁流动，这个电流的磁场，在圆筒中心空间正好和外磁场大小相等，方向相反，起到了屏蔽作用。上述的对于平板的公式 (5.1.2) — (5.1.4) 及其结论同样地适用于这里的圆筒。

二、磁通捕获

上述的由超导材料做成的空腔圆筒，如果先放在磁体中，这个磁场可以是我们在后加上去的，也可

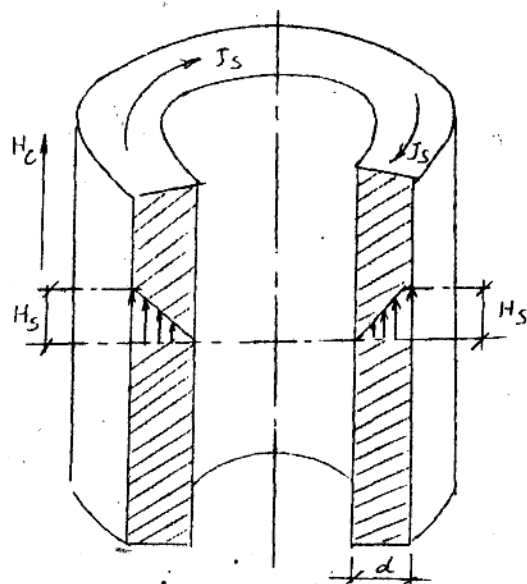


图 5.1.2

以是周围环流的杂散磁场或地磁场等，然后再降温使其转入超导状态，这时空腔中的磁通将陷入腔中，好象空腔将这些磁通捕获

起来了一样。只要超导状态不被破坏，空腔中的磁场实际上是不变化的，即使撤掉外磁场，它也仍然不变。这种因超导电性而被永远保存下来的磁通叫冻结磁通。有时也叫做磁通捕获。

在空腔中被捕获的磁场强度决定于外磁场，我们可以设法使空腔中的磁场强度大于外磁场许多倍，例如，对于超导材料做成的无筒形空腔，我们可以空腔中插入一个超导材料做成无杆。由于逆磁性，无杆中的磁场度为0，从无杆中排挤出来的磁通，加入无杆外P的空腔中。于是，这里的磁场度大 $\langle 1 \rangle$ 。

一个更有趣的磁通增强办法如图5.1.3所示 $\langle 2 \rangle$ 。在超导体无柱内，开两个通孔a和b，两个孔的当中开一个窄的通槽，将两孔连通起来，加上磁场，磁场的方向平行于无柱体的轴线，于是磁场穿透整个无柱体及空腔中，再降温，一直到该超导体的临界温度以下，无柱体转入超导态，无柱实体中的磁场被排出，而空

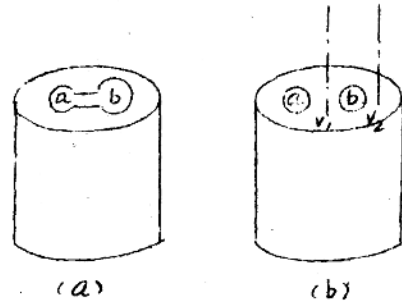


图5.1.3

腔中则仍然保持着。即使外磁场撤掉，磁通也仍旧保持着，然后在b孔中插一根超导体棒，当这个无棒插下去的时候，b中的磁通，通过连结槽而进入a孔内，如果b孔比a孔大，由于b孔中的磁通加入，将使a孔内的磁场加强。不过用这种方法，b孔中的磁通，只能一次进到a孔内，磁场的增强是有限的，如果将这种方法改进，如图5.1.3b，则b中的磁通可以多次地移到a中，因此，原则上这样可以产生很高的磁场（等于该超导体的临界磁场）。在图5.1.3b中， V_1, V_2 是镍铬丝加热口，用来断续的加热超导体，使其在超导态及常导态之间反复变化，从而 V_1, V_2 对磁通的加入与否，起着阀门的作用。工作过程如下：首先，在外磁场下将