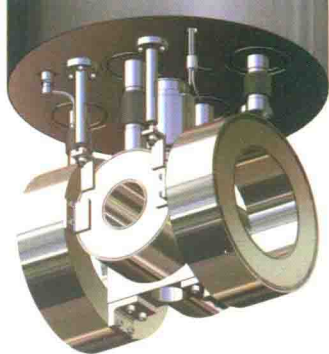
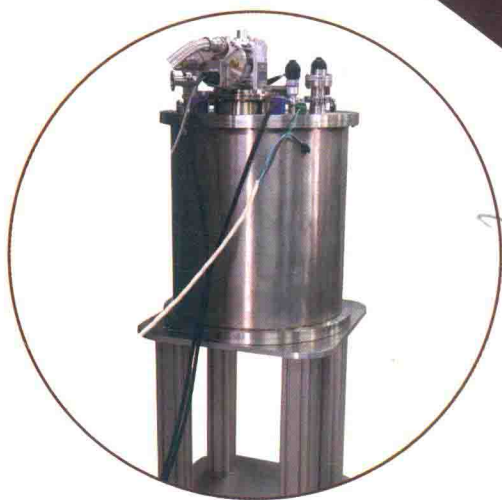




超导磁体理论基础与设计应用

□ 郭蓓蕾 著



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

超导磁体理论基础与设计应用

□ 郭蓓蕾 著



图书在版编目(CIP)数据

超导磁体理论基础与设计应用/郭蓓蕾著. -- 成都:
电子科技大学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-5647-5300-9

I.①超… II.①郭… III.①超导磁铁-设计 IV.
①TM26

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第280556号

超导磁体理论基础与设计应用

郭蓓蕾 著

策划编辑 李述娜

责任编辑 唐祖琴

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 北京一鑫印务有限责任公司

成品尺寸 170mm × 240mm

印 张 15.25

字 数 331千字

版 次 2018年8月第一版

印 次 2018年8月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-5300-9

定 价 53.00元

版权所有，侵权必究



郭蓓蕾

博士，河南城建学院教师

2011年毕业于中科院近代物理
研究所

主要从事加速器磁体设计，超
导磁体设计及失超保护等相关
领域的研究

前 言

磁体设计是强电领域的重要任务之一。随着超导技术的发展，超导磁体的应用得到了极大的开拓。超导磁体不但在一些领域取代了或正在取代着常规磁体所承担的角色，而且还开辟了常规磁体无法实现的新领域。超导磁体的电磁设计除了常规磁体设计的内容，还需要解决一系列更深层次的相关问题。因此，本书《超导磁体理论基础与设计应用》应运而生。

笔者结合了大量前辈学者的研究成果和自己多年来在超导领域的研究与实践，从超导磁体设计的理论基础入手，结合超导材料的电磁特性，阐述了超导磁体设计的特点和基本步骤，提出了一套有针对性的超导磁体多场耦合分析方法；然后采用超导磁体多场耦合分析的方法，结合多个超导磁体工程应用问题进行了设计与分析，进而在工程实践中发现和解决了遇到的一系列特殊问题。希望本次的研究能够帮助到相关领域的工作、科研人员，也希望通过知识的传播对我国超导领域的发展起到正面作用。

另因本书撰写历时漫长，书中或有些许不足，望读者朋友们不吝赐教，大家共同进步。

编者

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 超导磁体研究发展 /	001
1.2 超导体及超导线材 /	002
1.3 超导线材的临界特性 /	005
1.4 超导磁体的低温环境 /	007
1.5 稳定问题 /	009
1.6 电感计算 /	013
1.7 电磁力和应力 /	015
1.8 超导磁体设计的相关问题 /	018
1.9 场形和配置 /	020
第 2 章 超导磁体的设计方法	024
2.1 超导磁体设计概述 /	024
2.2 超导磁体设计的图形基础 /	028
2.3 单一线材超导磁体的设计 /	031
2.4 两种及两种以上线材超导磁体的设计 /	032
2.5 两种线材不同电流超导磁体的设计 /	035
2.6 高温超导磁体的设计 /	037
2.7 匀场磁体的设计 /	040
第 3 章 超导磁体的应用问题	047
3.1 螺管绕组 /	047
3.2 亥姆霍兹线圈 /	050

3.3	鞍形绕组 / 052
3.4	分立绕组 / 057
3.5	高温超导带材绕组 / 062
3.6	综合问题一：对极绕组 / 065
3.7	综合问题二：空间范围可调节的匀场磁体 / 067
3.8	综合问题三：微型螺管形高温超导带材储能磁体的优化问题 / 070
3.9	磁场计算问题 / 073
第4章	超导磁体失超计算及保护问题..... 080
4.1	基础工作 / 080
4.2	NbTi 磁体失超过程的解析分析 / 083
4.3	NbTi 磁体失超过程的模拟分析 / 092
4.4	失超保护方法 / 105
4.5	程序扩展 / 109
第5章	超导磁体的耦合问题..... 111
5.1	多绕组磁体系统的耦合 / 111
5.2	超导磁体的分段保护 / 116
5.3	超导磁体的次级线圈保护 / 123
第6章	超导磁体运行的主要部件及其闭环运行..... 128
6.1	电流引线 / 128
6.2	超导开关 / 144
6.3	超导磁体的闭环运行 / 154
6.4	电源 / 157
第7章	超导空芯变压器的电磁设计与实践分析..... 159
7.1	电压补偿型超导限流器的原理分析 / 159
7.2	超导空芯变压器的电磁设计 / 162
7.3	超导空芯变压器的电磁特性分析 / 171
7.4	超导空芯变压器的热分析 / 183

第 8 章 超导储能磁体脉冲输出的电磁设计研究	192
8.1 储能电感脉冲输出方法研究 /	192
8.2 高温超导空芯脉冲变压器可行性研究 /	197
8.3 脉冲输出过程中的电磁兼容问题 /	201
8.4 新型脉冲输出模式设计与验证 /	210
第 9 章 超导磁体电磁设计中的特殊问题.....	214
9.1 超导磁体电感变化研究 /	214
9.2 超导磁体的环流及其抑制方法 /	227
9.3 超导磁体低磁通耦合布局研究 /	232

第1章 绪 论

1.1 超导磁体研究发展

荷兰低温物理学家昂纳斯 (Onnes, Heike Kamerlingh, 1853—1926) 于 1908 年将氦气液化, 1911 年研究汞在低温下的电阻跃变从而发现了超导电性, 开创了人类认知的新领域; 其后, 迈斯纳 (Meissner) 等人发现了超导体在超导态具有完全排磁通效应 (迈斯纳效应), 对超导电性有了更全面的认识。1957 年, 巴丁 (Bardeen) 等人提出了超导微观理论 (BCS 理论), 阐述了超导电性的微观机理, 并继而由麦克米伦 (McMillan) 发展为强耦合理论。20 世纪 80 年代高温超导氧化物的发现, 使超导材料的研制和超导机理的探讨转入了一个更加活跃的时期。

在发现超导电性的初期阶段, 那些具有零电阻的金属载流能力极小, 无法获得实际应用。20 世纪 60 年代, Bell 实验室孔茨勒 (Kunzler) 等人研制出使用 Nb_3Sn 导体制作的磁体产生高达 8T 以上的磁场, 使实用型超导材料的研制出现转机, 其后, 斯特克利 (Stekly) 在稳定性判据方面做了开创性的工作, 继而研究人员提出了导线的稳定化方法, 才使得超导磁体的应用得到迅速发展。

由于超导磁体具有高电流密度, 可以满足高场强、高均匀度或高梯度的要求, 已经应用在工业、医疗、交通运输、环境保护、电力系统、科学研究等领域。伴随着低温技术的发展, 超导磁体系统的性价比有了很大的提高, 使得其应用的普及率得以提高。当前, 已经形成了超导磁体系列产品, 建成了中心场强超过 50T 的混合型超导磁体, 不均匀度达 10^{-7} 的 900MHz (对应的磁感应强度为 21.14T) 的核磁共振装置, 大型粒子对撞机和受控核聚变装置正在升级换代中, 为揭示物质世界的秘密和新能源的探索工作发挥着不同寻常的作用。

1.2 超导体及超导线材

超导体分为第一类超导体和第二类超导体。第一类超导体其界面能为正, 临界磁场最多不超过 0.1T。第二类超导体其界面能为负, 临界磁场较高, 在具有超导性的化学元素中, 只有少数几种属于第二类超导体, 如铌、钒和钽, 这些纯元素由于晶格中没有缺陷, 其临界磁场并不能达到可以制作超导线材的程度, 这样的第二类超导体称为理想第二类超导体; 另外一种第二类超导体, 其晶格中存在位错和脱溶相, 称为非理想第二类超导体, 一些经特殊工艺处理的化合物属于这一类, 如铌钛、铌三锡、YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)。

图 1.1~ 1.3 分别画出了第一类超导体、理想第二类超导体和非理想第二类超导体的磁化曲线。这些曲线都是在一定温度下的 $B-H$ 关系。在第一类超导体的 $B-H$ 曲线中, H 由 0 到 H_c 为迈斯纳态, H 大于 H_c 为正常态。在第二类超导体的 $B-H$ 曲线中, H 由 0 到 H_{c1} 为迈斯纳态, 由 H_{c1} 到 H_{c2} 为混合态, H 大于 H_{c2} 为正常态。迈斯纳态和混合态都是超导态。在 H_c 点、 H_{c1} 点和 H_{c2} 点发生的相变均为二级相变。对于第二类超导体, H_{c1} 称为下临界磁场, H_{c2} 称为上临界磁场, 二者为热力学温度 (θ) 的函数。其近似公式为

$$\begin{cases} H_{c1}(\theta) = H_{c1}(0) \left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_c^2} \right) \\ H_{c2}(\theta) = H_{c2}(0) \left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_c^2} \right) \end{cases} \quad (1.1)$$

式中 $H_{c1}(0)$ 、 $H_{c2}(0)$ 分别为 0K 时的下临界磁场和上临界磁场; θ_c 为超导体的临界温度。理想第二类超导体的临界电流是由 H_{c1} 决定的, 而非理想第二类超导体的临界电流是由 H_{c2} 决定的。非理想第二类超导体具有高得多的传输电流能力。两类超导体的磁化曲线的区别在于: 前者的磁化曲线是可逆的, 后者的磁化曲线是不可逆的 (这种不可逆性称为回滞现象)。非理想第二类超导体的回滞现象是由晶格中的缺陷造成的。缺陷使得超导体内部的磁通线呈现不规则的排列, 说明缺陷即是对磁通线产生钉扎力的物质基础。钉扎力越强, 回滞现象越严重, 临界电流就越大。

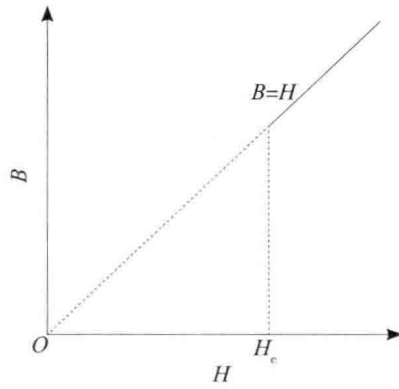


图 1.1 第一类超导体的磁化曲线

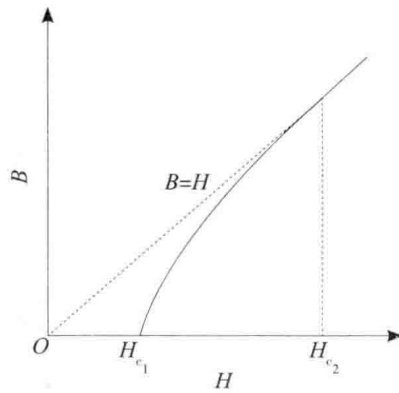


图 1.2 理想第二类超导体的磁化曲线

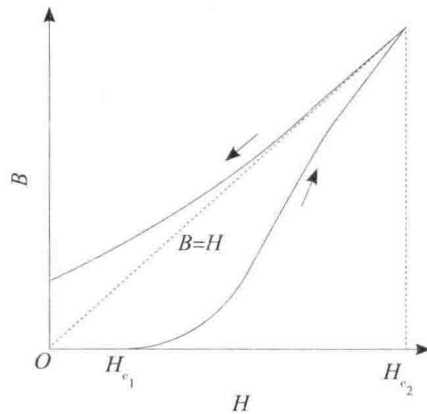


图 1.3 非理想第二类超导体磁化曲线



实用的超导材料都是由非理想第二类超导体制作的。较早的超导线为铌钛单芯线，它由铌钛棒外套铜套经冷轧和拉制而成。另外一种为铌三锡带材。其后，细丝化技术得以发展，芯径可达几十微米，使得电流密度大大提高。再后，进一步降低了芯径尺寸（达几微米），使得交流损耗大大降低，同时发展了高强度线材，大容量电缆。近年，高温超导带材也有了长足的发展。最常用的超导线材是铌钛线，它柔韧性好，易于绕制。这种多芯超导线是由经过热处理的多根超导棒外套无氧铜套，初步挤压成形后有序排列在一个大铜管中，经冷轧和拉制再经热处理而成。具有上万根超导芯的线材需要几次这样的集中和轧制的过程。有时在中间环节几根多芯棒中配一根铜棒以增加稳定性。在大容量导体中往往要衬以高强度合金或不锈钢。一个新的科研项目也往往专门研制一些特殊要求的线材和电缆，因而也加速了超导线材整体水平的提高，例如，铌三铝超导线材和高纯铝基稳定的 NbTi 线材的研制。表 1.1 列举了一些超导线材种类。此后涉及的均是由非理想第二类超导体制作的超导材料，因此以 H_c 代表上临界磁场，并习惯上称其为临界磁场。对应的临界磁感应强度为 B_c 。

表 1.1 超导线材种类

线材种类	稳定基材等	特点	备注
NbTi	铜基，高纯 Al 基	θ_c 约为 10K B_c 约为 10T	小型实验磁体
高强度 NbTi	铜基，高纯 Al 基		大口径混合磁体
Nb ₃ Sn	铜基	θ_c 约为 18.1K B_c 约为 22T	小型实验磁体
三组分 Nb ₃ Sn	铜基 NbTi 隔离层		加速器磁体
高强度 Nb ₃ Sn	铜基，Cu-20wt% Nb 或 Cu-0.6wt% Al ₂ O ₃ 等复合材料	力学性能大大增强， 传导性好	大口径混合磁体
Nb ₃ Al	铜基	θ_c 约为 18.8K B_c 约为 29T	有望取得实际应用
Nb ₃ Ge	铜基	θ_c 约为 23.2K B_c 约为 22T	成材方法在研制中
卢瑟福电缆 (Rutherford Cable)	铜基	多股扭绞成扁截面	大型磁体高能加速器磁体
CICC 导体(电缆) (Cable-in-Conduit conductor)	铜基	通以超临界 氦进行冷却	D 形线圈，大口径磁体

续 表

线材种类	稳定基材等	特点	备注
YBCO($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)	带材为 Ni 合金基材， 表面敷 Ag	θ_c 约为 95K	薄膜，块材，第二代带材 处于研发中
Bi - 2 2 1 2 带 材 或 圆 截 面 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$)	Ag-Au	θ_c 约为 90K	小型实验磁体
Bi-2223 带 材 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$)	Ag-Au	θ_c 约为 110K	小型实验磁体 电流引线
HTS 电缆	铜	有液氮冷却	输电电缆 (Bi-2223) 卢瑟福电缆 (Bi-2212)
MgB2		θ_c 约为 39K	处于研究中

随着金属冶炼和线材制造技术的发展，线材性能得到了很大提高。这表现在临界电流、抗干扰性、交流损耗、力学强度等指标上。同时，线材性价比不断提升，线材的价格逐渐下降到一个稳定的水平。

这里给出几类超导线材 2000 年在国际市场上大致的价格性能比：

- NbTi 0.9 美元 / (m · kA)
- Nb₃Sn 5 美元 / (m · kA) ~ 6 美元 / (m.kA)
- BSCCO 带材 300 美元 / (m · kA)

高温超导带材尚不易提供较长且性能均匀的商品，故其价格还与线长关系密切。这类超导材料的价格远远高于传统的低温线材，即使自 2000 年高温超导带材的价格又降到约一半的水平，但如今仍是超导应用领域的奢侈品。近年，高温超导材料应用于输电电缆、变压器、限流器等方面的研究工作方兴未艾，这也促进了线材制作技术的进步和产品合格率的提高。特别是第二代高温超导带材的研制，从生产工艺上使生产成本大幅度降低，将会直接影响价格的下跌，有望在不久的将来使价格降到每米每千安 50 美元甚至更低，并因此获得更为广泛的商业应用。

1.3 超导线材的临界特性

超导线材在一定的温度和磁场条件下可以无阻地通过一定的电流，其可承载的最大电流称为该温度和磁场条件下的临界电流。这个磁场条件包括磁场大小和

磁场方向。由于温度、磁场和电流是相互制约的，同样可以引申出临界磁场和临界温度的概念。临界磁场是指在一定的温度下超导体对通过的电流呈现无阻状态的最大磁场。临界温度是指在零场下（或自场下）超导体对通过的电流呈现无阻状态的最高温度。图 1.4 显示了超导线材的临界电流密度与外界磁场的关系。线材因生产工艺的差别其各自产品的优势可以表现在不同的磁场区间，从而可使磁体配置更加优化。

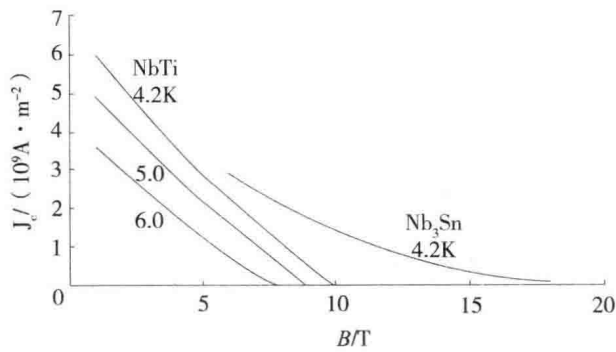


图 1.4 超导线材的临界电流密度与外界磁场的关系

将铌钛线在不同温度下的曲线族扩展成三维坐标下的曲面，就形成了温度、磁场和电流密度的三元关系图（图 1.5），3 个物理量所形成的临界曲面之下是超导材料的超导态，曲面之上是正常态。由于这里考虑的是实用材料，因此以磁感应强度（ B ）代替磁场强度（ H ），电流密度（ J ）是指超导丝内的电流密度。从应用的角度考虑，3 个物理量的临界值处于不同的层面：临界电流或临界电流密度是磁场和温度的函数；临界磁场是温度的函数（此时电流或电流密度趋于零），而通常所说的临界温度仅与超导材料有关。对照图 1.5，可以用平行于 $J-O-B$ 或平行于 $J-O-B$ 的一些平面切割临界曲面，从而形成一些对

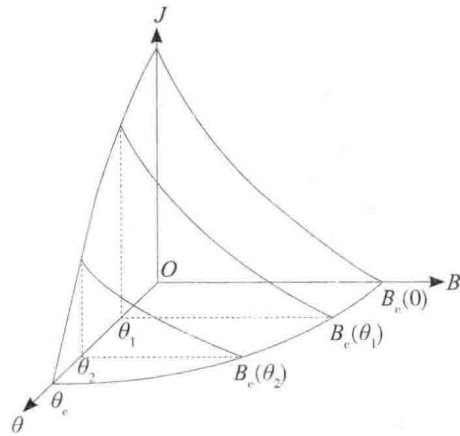


图 1.5 铌钛线的温度、磁场和电流密度的关系图

应于不同温度的 J_c-B 曲线或对应于不同磁场的 $J_c-\theta$ 曲线。对临界磁场，通常不用平行于 $B-O-\theta$ 的平面切割临界曲面去研究某一电流密度下的磁场与温度的关系， $B-O-\theta$ 平面与临界曲面的交线形成了唯一的 $B_c-\theta$ 曲线；通常则只与材料相关，在图 1.5 中表现为临界曲面与 θ 轴相交的一个点，特殊情况下 θ_c 代表某一磁场下材料的临界温度。

图 1.6 是以平行于 $J-O-\theta$ 的一些平面切割图 1.5 的临界曲面形成的一族 $J_c-\theta$ 曲线，表示在不同磁场下的临界电流密度与温度的关系。当温度在液氮温度以上时，这些曲线近似为直线；但温度趋于零时，曲线的斜率趋于零。

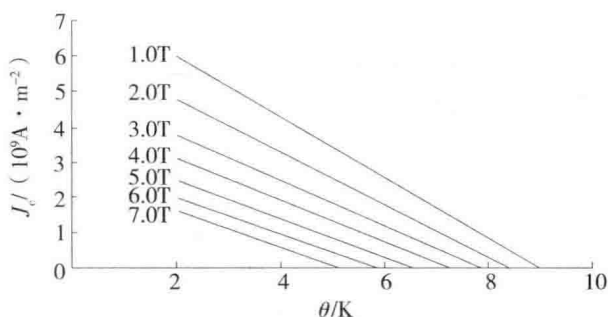


图 1.6 铌钛线在不同场强下的 $J_c-\theta$ 曲线

1.4 超导磁体的低温环境

传统超导材料的临界温度不超过 23K，因此只有液氢和液氦满足低温条件。而液氢的温度高于液氦的温度，且易于爆炸，所以液氦最适于用做超导磁体的冷却液。液氦是构成低温环境的重要介质，下面介绍几个与氦有关的名词。

(1) ^4He ($\text{He}-4$) 其原子核由两个质子和两个中子组成，丰度接近 100%，在 1atm (1atm=1.013×10⁵Pa) 下液化温度为 4.18K。

(2) ^3He ($\text{He}-3$) 其原子核由两个质子和一个中子组成，丰度为 1.3×10⁻⁴%。

(3) 超流氦 (Superfluid Helium) 即 He II 。当液氦温度降至 2.17K， $\text{He}-4$ 发生第二类相变，形成超流氦。该转变温度称为 λ 点。之所以称为 λ 点，是因为液氦的比热容随温度的变化曲线在该点附近呈现出字母 λ 的形状，其峰值约为 3Cal/K (1cal=4.1868J)。液氦在 λ 点之上称为 He I ，在 λ 点之下称为 He II 。

He II 的特点是显现出流动无阻的现象, 且热导率极高, 因而是优良的低温介质。

(4) 超临界氦 (Supercritical Helium) 通常的液氮作为冷却液实际上是气液两相的, 在冷却过程中有膜沸腾现象, 大大降低了冷却能力。当压力增加到 2.24atm 时, 氦成为单相的, 温度低于 5.2K 为液相, 称为增压液氮; 温度高于 5.2K 为气相, 称为超临界氦。这两种状态之间的过渡没有相变发生, 在应用中往往统称为超临界氦。超临界氦 (增压液氮) 用于 CICC 导体中, 冷却大型超导磁体。

超导磁体的正常运行要求一个稳定的低温环境。通常的实验磁体是浸泡在液氮之中, 液氮储存在带有真空夹层的杜瓦容器中。一些早期的超导磁体实验是在石英玻璃做成的杜瓦容器中进行的。玻璃杜瓦容器的优点是成本低, 结构简单, 操作容易, 可直接观察冷却液的液面; 缺点是易破碎, 且只能做小型磁体实验。金属杜瓦是最经常使用的低温装置, 如图 1.7 所示。

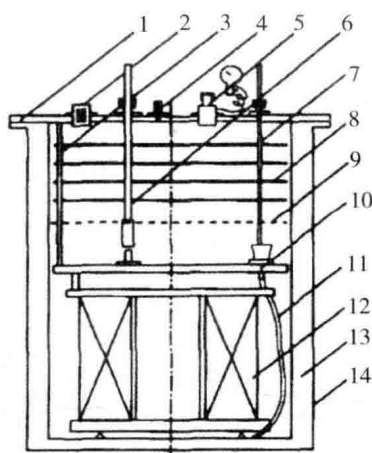


图 1.7 低温装置简图

1—盖板；2—信号接线座；3—拉杆；4—回气出口；5—安全阀；6—引线；
7—输液管；8—辐射屏；9—液面；10—连接板；11—输液软管；12—磁体；
13—多层绝热；14—杜瓦外壁

最近 10 余年发展了 G-M 机冷头直接冷却超导磁体的技术, 二级冷头可将超导磁体冷却到 4K 甚至更低。英国低温咨询公司于 1980 年左右研制的一种小型磁分选机可以算作利用 G-M 机直接冷却超导磁体的雏形, 这种早期的装置使液氮流过蛇形盘管以冷却磁体。现在的商品 G-M 机 4K 冷头的制冷功率已达 1.5W 以上, 但毕竟只能满足小型超导磁体的冷量需求。对这种直冷式装置, 整个系统的热分

析和隔热设计问题十分重要,需要对静态和动态(磁体励磁及工作状态)的热负载,包括磁体热量,热辐射,拉杆及支撑体、引线、测量线的热传导做详细计算。其电流引线采用上部为铜材,下部为高温超导材料的复合结构,利用了高温超导材料的低热导特性。一级冷头冷却隔热屏及高温超导电流引线部分的上端。图 1.8 是带有垂直室温孔的直冷式超导磁体系统的结构简图。

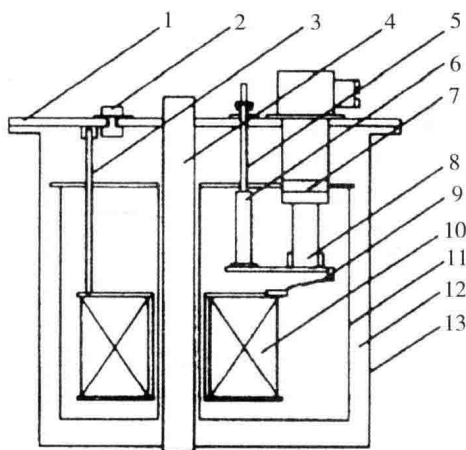


图 1.8 直冷式超导磁体系统的结构简图

1—盖板；2—信号接线座；3—拉杆；4—室温孔；5—引线上端（铜）；
6—引线下端（高温超导材料）；7—一级冷头；8—二级冷头；9—传热软线；
10—磁体；11—冷屏；12—多层绝热；13—杜瓦外壁

高温超导带材绕制的磁体可以浸泡在液氮中工作,但大多数系统工作在低于 77K 的温度中,以提高电流密度。利用 G-M 机冷却高温超导带材绕制的磁体一般采用二级冷头为 20K 或更高的温度。

1.5 稳定问题

超导磁体的稳定问题主要是研究如何减小磁体的退化程度,最大限度地提高磁体的运行电流并稳定工作。它要解决的问题包括磁体可能受到哪些干扰,这些干扰对磁体的影响程度如何,怎样减小或消除这些干扰;如何确定线材和磁体的相关参数和结构,从而保持工作状态下的超导态不被破坏以及磁体一旦受到干扰