



脉冲超导磁体研究现状

徐绍旺

(中国科学院原子能研究所)

一、概 况

从1911年荷兰物理学家卡默林·昂内斯发现并解释超导现象，到研究超导磁体作为高能物理中的加速器和实验装置中的磁体，经过了很长一段时间。高能物理研究对加速器和相应的实验装置能量不断增长的需要，以及工业技术发展的状况，促成六十年代初、中期，在世界几个主要高能物理实验室里，逐步开展直流和脉冲超导磁体的研究^[1]。

超导磁体在高能物理研究中，主要有两方面用途。

直流超导磁体用来作为实验装置中的磁体，如气泡室的磁体；以及作为带电粒子输运中聚焦和偏转磁体。前一种磁体在1968年已由美国阿贡（Argonne）实验室研究成功，并投入运转。目前世界上即将建成最大直流超导磁体，作为15呎气泡室的磁体，安装在美国国立加速器实验所，能量为4000亿电子伏特的加速器实验装置上。后一种磁体，正在美国的阿贡和布鲁克海文（BNL）实验所建造，不久也将投入运行，可望近年内逐步推广。用直流超导磁体代替直流铁磁体，对节省功率、减低运转费用有很大的意义。如西欧联合核子研究中心（CERN）能量为280亿电子伏特加

速器上进行物理实验所需的电功率为33兆瓦^[2]，如果铁磁体全部改用超导磁体，由于超导体在直流下电阻几乎等于零，为建立磁场所需要的励磁功率，每个磁体仅约需几瓦，再加上制冷设备的功率，总共需要的功率也将大大减少。

同步加速器的磁场，按脉冲规律工作，具有三角形或梯形波形。脉冲超导磁体就是用来代替同步加速器中的铁磁体，因此也称脉冲超导磁体为“同步加速器超导磁体”。目前已建成和即将建的同步加速器中铁磁体，最高工作磁场为2T（忒斯拉），一个能量为4000亿电子伏特的加速器，其环形铁磁体直径约两公里。如果能量增高到 4×10^{12} 电子伏特，环的直径将需20公里。这样巨大直径的加速器，在建造时就会受到很大限制。超导磁体的研究成功，就有可能使加速器环形缩小。

直流超导磁体已研究成功，目前正向着更完善和提高经济指标发展。从单纯的技术角度说，利用直流超导磁体成熟的工艺技术，使之推广，那末一个超导磁体用几秒的时间，从零上升到最大工作磁场，应该也没有原则的困难。不过要求的脉冲磁体不单能产生一个磁场，而且要有一定精度、可靠性和相对铁磁体的经济性。问题就在于脉冲磁体工作时的交流损耗，使脉冲

表1 世界各国一些超导磁体短样品指标

国 别	英 国	法 国	西 德	美 国		苏 联
实验所名称	Rutherford	Saclay	Karlsruhe	BNL	LBL	Ralan
样品专有名称	AC ₃	MOBY				
超导材料	铌钛	铌钛	铌钛	铌钛	铌钛	铌钛
线圈孔径(厘米)	10	10	12×8	5.7	10.2	8
磁体长度(厘米)	40	50	100	35		70
导线截面(毫米 ²)	5×5	2×4				
导线组成股数	93	24				
每股直径(毫米)	0.4	0.44				
每股芯数	1045	1000				
芯直径(微米)	8	10				
孔径中心磁场(T)	4	6		4	2.7	4
电流密度千安培/厘米 ²	10	15			19.5	
浸固材料	填充环氧	树脂-玻璃纤维		金属		
脉冲上升时间(秒)	1—2	20				

磁体达到上述要求,增加了一系列的工艺复杂性,而工艺复杂性导致了磁体成本增加。

从1970至1972年间,世界上几个主要高能实验所制造了一些二极和四极磁体短样品,其各指标列于表1。制造研究的实践表明,正是由于交流损耗以及因此而引起的不稳定性等问题,目前还不能经济地用来建造加速器。

二、经济性对设计参数的约束^[3]

通过超导磁体经济性的研究表明,要使超导磁体同步加速器较之通常加速器不过份昂贵,设计中对其某些严重关系到经济性的参数有一定约束。因此在研究中首先要达到这些指标,才能谈得上采用的可能性。

1. 制冷成本

要使制冷成本在允许的数值下,就得要求每米磁体的交流损耗在10—20瓦范围内。与交流损耗直接有关的主要因素如下。

(1) **脉冲循环周期** 假定脉冲磁体的电流按对称三角形波形循环工作,循环周期即为两倍的上升时间。因此为达到线圈中心一定的磁场,随着周期的减小,即上升时间缩短,导体的交流损耗急剧增长,从而致使制冷成本和总成本增长,图1中给出一个1000亿电子伏特加速器设计时,成本与脉冲循环周期的关系^[4]。所以从经济上考虑,应使脉冲循环周期约束在10—20秒甚至更大的范围较为合适。

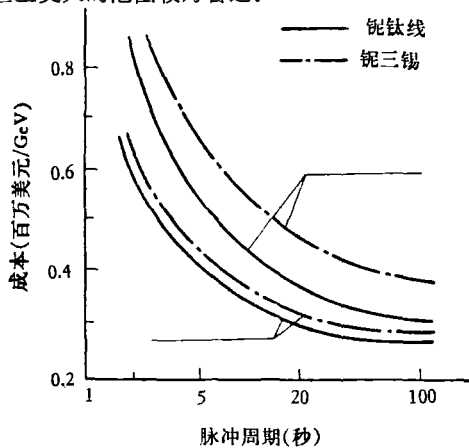


图1 最佳磁场下成本与脉冲周期关系
(图中上横线处为孔径5厘米,下横线处为孔径4厘米)

(2) **超导线的尺寸** 脉冲状态下工作的超导线圈中交流损耗与导体尺寸直接有关,应要求导体单芯的直径在5—10微米内,并在编成股时,按严格的节距扭向,才有可能满足允许的总交流损耗数值。

(3) **磁体中最高温度与制冷机的温差** 随着导体温度的增长,导体的临界磁场迅速下降。随着超导体

工作温度下降,制冷成本急剧增加。设计中必须考虑足够的冷却通路,使导体交流损耗的热量能迅速被冷却液体带走,而温升不超过0.1K,以维持磁体与制冷机间温差在0.1—0.2K内。

2. 导体材料和供电成本

这两项成本与磁体几何尺寸有关。

(1) **磁体孔径** 在既定的中心磁场下,孔径的增大将要求导体尺寸与安培匝数增加,这就导致线圈储能和导体材料增加;尤其是在线圈外不用铁屏蔽的情况下增加更剧。图2中示明这个关系。因此应该使磁体的孔径在10厘米以下。

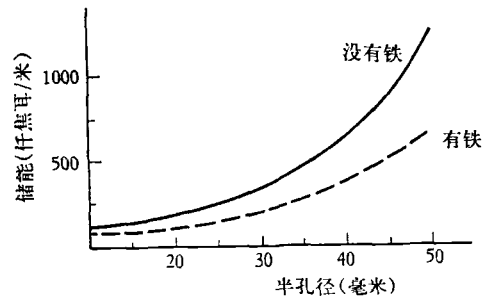


图2 线圈孔径与储能关系

(2) **线圈的径向厚度** 线圈的厚度过大,不仅增加所需导体的量,而且使冷却、机械结构和制造工艺复杂化。一般应该使线圈径向厚度在3—4厘米范围内。既定的厚度再加上孔径范围的限制,导体的电流密度也就限定在每平方米 $2.5-3 \times 10^4$ 安培以上。如果采用外部加铁屏蔽,由于减少了空气里的散磁而降低了所需安培匝数,电流密度一般略小。

注意到超导导线结构中基材、绝缘、冷却孔道所占的面积,在上述电流密度下,导体中实际电流密度已接近临界。

超导材料临界电流与临界磁场的关系,使导体工

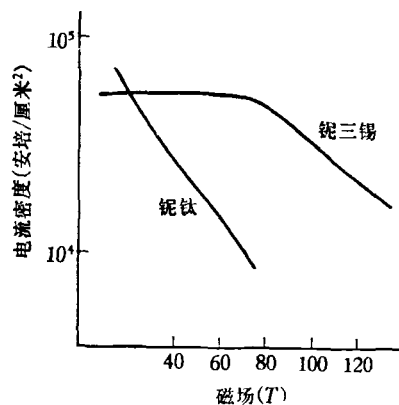


图3 线圈中最大磁场与电流密度

作电流密度与其能产生的最大磁场之间有一定关系,如图3所示,可见对铌钛线来说,在上述电流密度下,只宜达到3—5 T 的磁场。

3. 线圈的精度以及相应的生产成本

要使超导同步加速器具有较好的工作性能,不论是作为偏转带电粒子,或是作为聚焦用的二极和四极磁体,在低磁场(即带电粒子注入到加速器时的磁场)到高磁场(即粒子加速到最大能量时的磁场)之间的任何磁场下,其有效孔径内磁场不均匀性不大于0.1—0.2%,同时还要求有效孔径为其孔径的75—80%。这样才能经济地利用磁体。为达到这一要求,对线圈制造工艺提出很苛刻的技术条件,线圈形状和位置的系统误差不大于0.02—0.04毫米,偶然误差0.2—0.4毫米;并且长时期经受热和机械周期性循环,而不改变精确位置。

为达到要求,首先要研究电子计算机设计磁场的程序,从理论上给出导线的位置,尤其要注意到线圈端部的形状。然后要用可靠的机械结构来保持精确位置。

在保证上述精度下,要采用合理可靠的设计,使生产工艺足够简单,以降低成本。

4. 一个设想加速器的成本例子

假定上述的指标都达到的情况下,卢瑟福实验所对一个能量为1000GeV的质子超导同步加速器磁体系统作了成本估价。假定二极磁体的孔径8厘米,中心磁场为4.5 T,脉冲循环周期10秒。则各主要部分成本为:

- (1) 超导线材料(10³公斤),50—200兆瑞士法郎;
- (2) 线圈和杜瓦瓶生产,100—250兆瑞士法郎;
- (3) 制冷成本(30—1000千瓦,工作在4.4K),
50—150兆瑞士法郎;
- (4) 供电(300—1000兆焦耳),
50—100兆瑞士法郎;
- 共计 250—700兆瑞士法郎。

一般磁体系统占整个加速器成本的三分之一,因此象上面所列的数字,差不多已经是成本的上限了。

应该指出,影响经济性的不仅是上述几项,其他还有剩余磁场、辐射和热损伤、磁体磁场熄灭时的保护等等,不过这些因素对经济性的影响是二级的了。

三、设计中几个主要问题考虑原则

目前脉冲超导磁体的研究还不能达到上节中所提及的一些主要指标,研究中遇到一系列的设计和工艺问题,某些问题从原理上还没有完全弄清楚,或者在技术上还有实际困难,但限于篇幅,不能一一加以叙述,

只就几个主要的问题加以讨论。

1. 磁体选型及磁场设计

近年来同步加速器的设计多采用分离作用的磁体系统,就是把偏转和聚焦的磁体分开,这种系统对大型同步加速器更为适合,它给采用超导磁体提供了方便。因而一个超导同步加速器磁体系统,无非包括两种类型的磁体,二极和四极磁体。四极磁体选型是唯一的,即均匀分布在圆周上的四组导线,工艺问题与二极类同,因此以下讨论中仅以二极磁体为例。

可以产生均匀磁场的二极磁体型式基本上为两种,一种为圆形,导线电流按 $\cos\theta$ 分布;另一种是两个圆或椭圆相交,导线电流均匀分布,如图4。在同样的孔径下,前一种要求较多的安培匝数,但工艺较简单,后一种则相反。

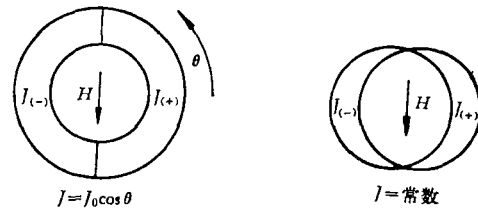


图4 产生均匀场二极磁体理想型式

从这基本型式出发,各实验所研究了多种导线排列的结构,如图5。这种结构的选择,既考虑到产生必需的磁场形态,还要考虑到冷却通道、机械结构、经济性等一系列问题。图中所示的结构型式,只要保证导

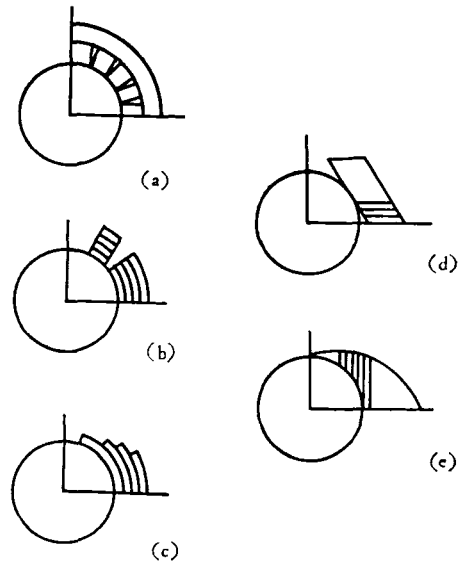


图5 几种实际导线排列的截面

- (a) BNL; (b) Rutherford, LBL, Karlsruhe;
- (c) Rutherford, LBL; (d) Saclay; (e) Karlsruhe.

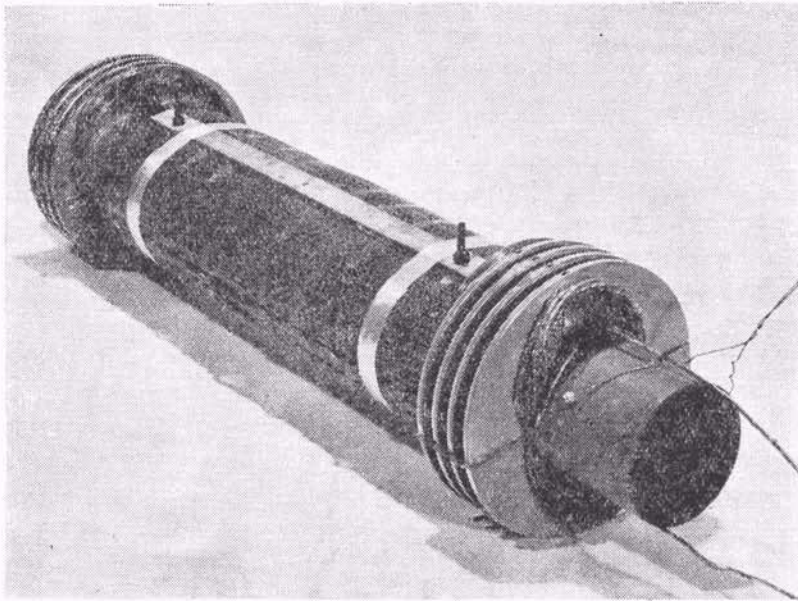


图6 一种随机的绕法 (LBL)

线的安装误差在 0.02—0.04 毫米内,可以在磁体孔径内 70—80% 区域产生具有足够均匀的磁场。

几年前在劳伦斯实验所 (LBL) 研究了一种随机的绕法^[1] (如图 6), 以降低生产成本。他们在 1968 年第一次测试中, 由于端部塌陷和松散而没有成功, 以后改进了工艺方法, 绕制了三个二极磁体。这种绕法具有成本低和填充系数较高的优点, 但不适用细的多芯导线绕制; 因为细而长的导线形成大的电感和电压, 而细导线不能载以几百安培的电流, 就要求几个磁体并联工作, 才能与功率源的电流电压相适应。后来由于多芯绞股超导电缆的成功, 随机绕法被有次序的替代。

超导磁体外部多包以硅钢片, 减小空气中的散磁, 在同一孔径和中心磁场下, 减低安培匝数而降低线圈中的储能。图 7 中表示有无铁屏蔽情况下, 储能随孔

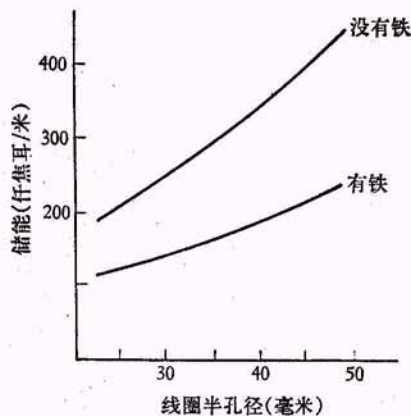


图7 有无铁屏蔽时储能与孔径关系

径增长的趋势。

铁屏蔽分为两种形式。一种将铁放在杜瓦瓶里, 处在低温下, 也叫作冷铁。另一种则放在线圈的杜瓦瓶外, 处在室温下, 称为温铁。前一种由于减小一层杜瓦瓶厚度, 更靠近线圈, 根据其靠近程度不同, 可减少储能 15—50%, 但要注意不能使铁饱和, 否则将产生非线性而影响场的均匀性。后一种离线圈远一些, 减少储能仅 5%, 对线圈影响较小。

利用计算机, 注意到铁中 $B-H$ 特性, 就可能不用传统的办法, 细致地研究铁屏蔽对中心磁场的影响。结果表明, 铁最靠近线圈、孔径中最大磁场 4.5 T 时, 磁场的形态尚可满

足要求。而中心磁场到 5—6 T 时, 必须采用温铁结构。

线圈端部设计是一个复杂的问题, 特别是因为这个问题在理论上与实际很难协调。包括铁的饱和因素并具有足够精度的三维计算机程序, 正在研究。不过端部设计的物理原则是清楚的, 它较之主体的精度要求, 低一个数量级。端部设计具有两种型式: 一为上弯型, 做起来简单, 但增加径向尺寸, 较难冷却和采用铁屏蔽; 另一种为光滑型, 每层导线组弯成同样半径, 它增加轴向长度。

由于电子计算机设计精度、导线绕制精度的限制, 再加上剩余磁场的不均匀性, 为达到孔径磁场的 0.1% 均匀度, 还要用校正线圈^[4], 尤其是对低磁场。所以设计时孔径要有足够的余地, 供将来安放校正线圈。

2. 自场效应

为防止外磁场下超导导线间的耦合, 每一股导线要扭起来, 但到目前为止扭的规范还没有很好懂得和满意的证明。不过多芯扭股导线的成功, 交流损耗与理论计算已很接近。只是对每股中由各芯自场引起的附加耦合, 了解得较少, 这就是自场效应^[7]。自场效应的作用, 使得股直径增加时, 产生股截面上电流的不均匀分布, 如图 8 所示。从而增加交流损耗和出现磁通的跳跃不稳定性。究竟股的直径大到什么数值, 效应严重起来, 现在的解释不一。英国卢瑟福实验所初步简单的实验指出, 用波状校正股的办法, 直径增至 1 毫米, 通常还是安全的。而 (LBL) 用扭电缆, 加上波状校正, 自场效应的损耗已足够低了。

一些理论上的设想, 如移动超导丝芯的电中心和

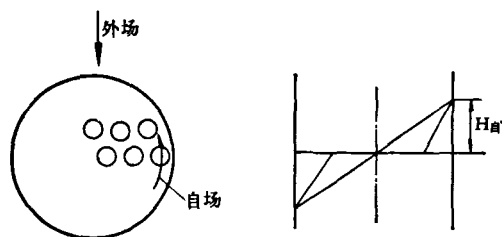


图8 自场效应

扭绞的结构,以改善电流分布,但尚未实验证明。

自场效应与超导线的基材有关,在铜镍的基材中,当直径小到 0.25 毫米时,通常还可以看到明显的磁通跳跃。

同心超导电缆本来是一种很容易生产的导线,由于自场效应,对各芯相对位置要求很严,即使是仅仅几微米的误差,就引起附加的电流非均匀分布。曾在 7 芯电缆中,当工作在直流时,各芯都载有相同正电流,可是用几秒上升的脉冲电流时,在正中芯中观察到反向电流,这就是不均匀性的结果。

目前的结论是,单股直径 1 毫米还不完全清楚,视各种情况而定,直径到 1.8 毫米,在使用中就有些冒险,如果再大,则太冒险了。

3. 运行的稳定性

如何使超导体工作在接近临界电流,是一个很重要的问题,而与这个问题有联系的关键,是多芯绞股超导线磁通跳跃不稳定性。正是这个特性不能克服,妨碍了早年制成满意的超导磁体的原因。通过大量地在大螺线管上进行直流和脉冲试验表明,原则上在大磁体里它们可能工作在很接近临界电流。

一些试验中,只要线圈中存在任何可能释放能量的来源,就不可能可靠地达到接近临界电流。例如突然导体的相对移动,即使是几微米,它所产生的摩擦热量,假定在一立方厘米中储存 10—20 焦耳,足以使局部温度升高几度,而引起电阻变化。如不能将热量带走,其影响的结果,使超导态恢复到常导态的情况迅速扩大,最后磁场降为零,这叫做熄灭。

导体的移动用浸固以相应的材料来消除,如蜡等。但如果用强度过大的环氧树脂,则由于生产过程中,当冷却下来时,由于收缩不同,可能在线圈中产生内应力。一旦通以电流时,就通过产生裂纹,或者导体相对移动释放出来,并表现为低电流时熄灭;经过若干次的熄灭,得到“锻炼”后,最后达到最高工作电流。一种比较糟糕的情况是,这个“锻炼”过程要持续到熄灭几十次之多,而且每冷却下来以后又重复。

卢瑟福(Rutherford)实验所试验了 20 个相同的直流二极磁体的线圈,浸固以不同材料,用不同填充剂或无填充剂的环氧树脂,各种蜡、冰冻液体,如冰、油和固

态氮。结果表明强度较差的蜡和冰冻液体“锻炼”较少,甚至没有,无填充料的环氧树脂“锻炼”最长,通常每次重新工作时都要有“锻炼”。用收缩系数接近导体的环氧树脂,只在初次冷却后需“锻炼”,往后就较少或没有了,最后达到临界电流的 95%。该实验所 1971 年完成的一个脉冲磁体 A_c_3 ^[8],单个层线圈试验时,没有发现熄灭;可是安装在一起后,第一次通电流中,到达 3900 安培时,就发生熄灭;经过 20 次锻炼后,才达到工作电流 4800 安培,而其设计为 5000 安培。

在西德卡尔斯鲁黑(Karlsruhe)实验所也作了类似试验^[9],采用较好的工艺,浸固以无填充料的环氧树脂(Epoxy-aromatic-amine),单个线圈试验时,只在第一次出现了熄灭;可是当几个线圈装在一起时,出现十次熄灭,达到了设计电流。

美国布鲁克海文实验所和劳伦斯实验所用“福姆发”(Formvar)作为超导线间的绝缘^[9],有不同程度的熄灭;而用银锡绝缘时几乎不要“锻炼”。

可以说,只要使浸固材料的收缩与导体收缩系数合理匹配,第一次冷却下来时,可将生产中留下的应力消除,线圈将满足运行在大于临界电流的 90%。

一种设想用不浸固任何材料,而是用刚性的机械装夹,来防止导体的移动,或者是设计成液氦能围绕导体畅通,保证迅速带走任何摩擦产生的热量。但这些设想还没有变为有说服力的具体结构。因此近几年,无论是直流还是脉冲超导磁体,主要还是靠浸固合适的材料,来达到运行的稳定性。

4. 移热

带走热量的效率与机械结构有密切的关系。热量带走的路径首先是依靠导体的传导,使热量有效地传到表面,经过铜的基材,再通过薄薄的绝缘层,然后被导体邻近孔道里的液氮带走。

线圈中的热量主要是由于磁滞损耗,涡流以及单股之间耦合产生。自场的效应引起的附加损耗,当单股直径小到一定程度时,可以忽略。设单芯直径 10 微米,脉冲周期为 10 秒,每米磁体的损耗为 11 瓦。这样一个二极的磁体体积约为 66×10^3 立方厘米,在磁体中平均功率密度为 1.65×10^{-3} 瓦/厘米³,相应的热通量为 1.4×10^{-3} 瓦/厘米²,则其温升为^[10]

$$\Delta T = w_v \left[\frac{1}{2k} \left(\frac{Q}{2} \right)^2 + \frac{Q}{2h} \right]$$

式中, w_v ——单位体积内的功率损耗; k ——线圈的传导效率; h ——冷却剂散热效率; Q ——垂直于冷却通路的线圈宽度。

线圈中热导与线圈所浸固的材料有关,例如一个线圈包括无填充料的环氧树脂结构在内,当温度为 4.5K,传导效率为 2×10^{-3} 瓦/厘米每度 K,用有填充料的环氧树脂浸固时为 4.5×10^{-3} 瓦/每厘米每度 K。

线圈表面到液槽的散热率 h 与冷却剂有关, 在线圈温升为 0.2 K 时, 用沸腾液氮时最大热传导率 0.1 瓦/厘米²。如果用两相液氮, 根据雷诺数的不同, h 可为 0.6—0.8 瓦/厘米²。在一个具有流体直径为 0.5 毫米时, 使流速达到每秒 0.2 米, 为使线圈内部任何一块液氮温升不超过 0.1—0.2 K, 当用沸腾液氮和有填充环氧树脂结构时, 允许中间线圈厚 a 为 1.8 厘米宽, 而无填充料时为 1.2 厘米。为带走热量要求线圈每一层附近都要有冷却孔道, 采用图 4 中 a 、 b 、 c 就能满足, 而要设计图 4 中 e 、 d 这样的孔道就很复杂。卢瑟福和法国的萨克莱 (Saclay) 实验所研究用铜片和铝片冷却邻近层, 使线圈的热传到液氮槽里, 这种结构甚至在全部分固填充料的线圈里也能满足散热。苏联研究用纯铝作为芯的绝缘和基材, 认为纯铝有很好的传导性。

冷却有三种形式:

- (1) 静止液体的自然沸腾,
- (2) 通常压力的两相流动,
- (3) 压力单相流动。

理论上这三者只要有 0.5—1 毫米的孔道, 在适当的流速下, 可以满足传热要求。从制冷的整体观点考虑, 只能排除(3), 以(1)为最简单。但要在孔道表面增加 0.2 K, 这个还取决于材料及表面的自然特性。(1)与(2)之间的选择部分地取决于以后研究的结果, 部分地取决于整个制冷系统的设计。

杜瓦瓶问题简单一些。在完全空气芯磁体中磁场为 6 T, 上升时间短到 1 秒以下时, 由于涡流, 无论是在线圈内部和外部都不能采用通常不锈钢的容器。磁场低到 ~4.5 T, 上升时间为 3—4 秒时, 涡流效应可以减少一个数量级, 允许不锈钢杜瓦瓶内壁厚 1 毫米。如果有铁屏蔽靠近线圈, 由于铁外面的磁场可以忽略不计, 外壁厚度没有限制。在高场和短上升时间下, 研究了非金属的杜瓦瓶, 如环氧树脂玻璃纤维, 或者低损耗的皱纹不锈钢杜瓦瓶。

下面引入一个脉冲磁体系统产生的热量例子, 假定磁体孔径为 8 厘米, 超导芯直径为 5 至 10 微米, 那末每米每循环的损耗如下:

线圈中交流损耗	50—100 焦耳,
基材中的损耗	10—20 焦耳,
自场引起损耗	0—10 焦耳,
磁滞损耗	10—20 焦耳,
磁体总损耗	75—150 焦耳,
对于循环周期为 10 秒的相应功率	7—15 瓦,
其他涡流损耗	1—2 瓦,
杜瓦瓶漏热	2—3 瓦,
束流加热	0—1 瓦,
制冷机分配损耗	2—4 瓦,
总计每米总损耗, 在 4 K 时	12—25 瓦。

因此, 一个 1000 GeV 能量的质子同步加速器, 假设

其磁体系统总长为 4000 米, 总的损耗约 50—100 千瓦, 需要经常制冷功率为 20—50 兆瓦。

此外, 除考虑正常运行下的导体损耗外, 还应该注意意外情况下把热量能迅速带走, 总功率要留有足够余地。例如一个二极磁体, 每米长度上超导材料重量约 30 公斤, 线圈储能约 10⁷ 焦耳, 一旦磁场突然降到零时, 每一克导体在一秒钟内将放出 2.5—4 焦耳的储能, 遂使一克导体内温度升高 70°, 在设计制冷系统时就同时应该考虑到这种意外的可能情况。

四、各主要高能物理实验所研究动向

西欧联合核子研究中心曾设想用超导磁体建造能量为 1000 GeV 的加速器。因此西欧三个实验所近几年主要围绕这个目的进行着设计和制造的研究。

卢瑟福实验所在他们原来的基础上, 进展比较快。下面列出该实验所 1967 年以来研究脉冲超导磁体的逐年进度, 它在一定程度上反映了世界各实验所进展的情况。

1967, 1968 年, 研究超导导线结构;

1969 年, 在螺线管上进行试验;

1970 年, 制成二极磁体, 中心场 3.5 T, 长度 25 厘米, 孔径 4 厘米, 电流 1500 安培;

1971 年, 制成二极磁体, 长 40 厘米, 中心场 4 T 孔径 10 厘米, 上升时间 1—2 秒, 电流 5000 安培;

1972 年, 制成磁场具有精确分布的二极磁体, 长 40 厘米, 孔径 9 厘米;

1973 年, 将制成 100—200 厘米长的磁体。

在提高超导材料性能方面, 他们是改进铌钛线的结构, 以提高编织电缆的填充系数, 来提高电流密度, 以及减低在脉冲工作下交流损耗和简化设计和生产工艺, 以降低成本。

法国萨克莱实验所 1971 年开始设计二极脉冲磁体, 脉冲周期 6—20 秒。该实验所着重研究设计问题, 如磁体的孔径最佳形式和尺寸关系, 磁场校正问题等。

卡尔斯鲁厄实验所 1971 年已完成了一个长一米的二极磁体。该实验所系统研究线圈在静态和动态下的物理特性, 如磁热特性, 磁场和电流的加热效应, 还研究低温下用作超导磁体的金属和非金属材料特性。

美国布鲁克海文实验所围绕 100 GeV 冷磁体超导同步加速器和 200 GeV 加速储存环的目的进行研究。

这个实验所花很大力量研究高磁场的超导材料, 如铌三锡的多芯绞线, 他们已制成短样品; 后来由于钒三锡的出现, 放慢了研究速度。1971 年他们用多芯钒线置于铯-铜的基材中, 按一定规范加热制成多芯钒三锡线, 可望在近年内制成长 10000 英尺的线。

美国劳伦斯实验所围绕质子-电子-正电子储存环方案进行研究。进行了一系列最佳经济参数的分析,

拟着手建造一个能量为 2GeV 超导同步加速器模型。

美国国立加速器实验所拟建立一个超导同步加速器,将现有的 500GeV 加速器的束流注入到它里面,继续加速到 1000GeV。由于其注入能量较高,剩磁的不均匀性比较容易克服。计划 1973 年底完成实际加速器的一个周期,并进行功率试验。

苏联近年来也开展这方面工作,1971 年制成了一个孔径为 80 毫米、长 70 厘米的二极磁体,磁场 4.5T,验证理论与实际可能达到的磁场精度。也进行减小损耗等问题研究。电子物理仪器研究所制成了铌三锡螺线管磁体,场强 20 T。

总之各实验所都有设想的具体方案,但由于上述各项问题,还加上剩磁的不均匀性等等,近年内还不可能经济地用来建造加速器。对于前景的估计,美国各实验所较之西欧更为乐观些,认为再过 4—5 年即可着手建造;而西欧各实验所则认为尚需 7—8 年。西欧联合核子研究中心原来有个设想的计划,在现正在建造能量为 300GeV 的质子同步加速器中,将来补上若干超导磁体,可使能量提高到 500GeV。1973 年 4 月和 6 月^[11],几个实验所开会讨论,并最后决定改变这个计划,但这并不是由于超导磁体研究发生什么新的困难,而是方案上的变化。因为 300GeV 或 500GeV 同步加速器的注入器计划用能量为 28GeV 的同步加速器,但注入时能量为 10GeV。如果超导磁体参加工作以后,磁场变化的幅度的相应能量从 10GeV 上升到 500GeV。由于 10GeV 时磁场较低,不容易达到 0.1—0.01% 的剩磁均匀性,以及因为磁场变化幅度大而交流损耗也大,整个成本增加。这样一个方案的布局,不如另一个方案更为经济和把握,即将采用 300GeV 同步加速器作为注入器,注入到一个 1000GeV 的超导同步加速器里。这个加速器不要另建厂房,而是把超导磁体安在现在 300GeV 加速器的铁磁体上,这就相当于美国国内加速器实验所能量加倍的计划。

到目前为止,制成的超导脉冲磁体,都用铌钛线,主

要是由于它工艺性较好,但是它的场强很有限,比较好的铁磁体仅高一倍多,依然不能满足更高能量加速器的需要。近年来研究出很多高场的超导体,可是要使这些超导体能用来做成真正的脉冲磁体,还要经过一段研究。从这个意义上说,脉冲超导磁体的研究工作时间还很短。我们依靠毛泽东思想,发挥社会主义制度的优越性,学习外国好的经验,走自己的道路,向新的方向迎头赶上去,是一定可以赶超世界先进水平的。

参 考 文 献

- [1] Taylor, C. F., *Superconducting Magnets, International Conference on High Energy Accelerators*, (1961), 291.
- [2] Barbalat, O., *Catalogue of VIII. Internc. Conference on High Energy Acc.*, (1971), 2.
- [3] Smith, P. F., *Superconducting Synchrotron Magnets, VIII. Intern. Conference on High Energy Acc.*, (1971), 35.
- [4] *Economic Factors Involved in the Design of a Proton Synchrotron or Storage Ring with Superconducting Guide Field, USAEC-UCRL-18186*.
- [5] Wenzel, W. A., *Test Results—Pulsed Superconducting Synchrotron-type Dipole Magnet, VIII. Intern. Conference on High Energy Acc.*, (1971), 206.
- [6] Bronca, G., *Studies and Construction Superconducting Magnets Applied to Synchrotron of Morethan 1000GeV*, 同上, 175 页。
- [7] Group Rutherford Lab., *Superconducting Application, J. Phys.*, **D3** (1970), 1517.
- [8] Thomas, D. B., *Superconducting Pulsed Magnet for a 1000GeV Synchrotron, VIII. Intern. Conference on High Energy Acc.*, (1971), 190.
- [9] Heinz, W., *Superconducting Synchrotron Magnet Performance in a Closed Circuit Cryogenic System*, 同上, 181 页。
- [10] Green, G. K., *Superconducting Synchrotron Development at BNL*, 同上, 196 页。
- [11] *CERN Courier* (1973), 6.

近代天体物理学中的几个问题

杨 楦

(中国科学院原子能研究所)

长期以来,人类用以观测天体的波段,主要被限制在可见光辐射这一相当狭窄的频率范围之内。这一方面是由于设备和技术的不足,另一方面也由于人类长期居住在稠密的地球大气底层,而大气层仅对可见光等几段比较狭窄的电磁辐射透明的原故。这个情况在近十余年来开始有了很大的改变。由于射电天文等技

术的发展,人造地球卫星探测设备的应用,人类终于逐步地冲破了大气透光性的限制,可以在从无线电波频起直到高能 γ 射线止的、宽达 14 个量级以上的电磁波以及其他辐射区域内,对天体进行观测;这就大大地扩展了探索宇宙天体的眼界,导致了许多重要的新发现,提出了很多新的问题,进一步丰富了我们对于天体演化