

超导磁体

华中理工大学出版社

超导磁体

张志鹏 朱玉群 编译

责任编辑 李德

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.75 字数: 247,000

1989年1月第1版 1989年1月第1次印刷

印数: 1—1500

ISBN 7-5609-0244-8/O·34

定价: 3.80元

序 言

60年代以来，强磁场超导材料的研制成功，为超导电性在强电方面的应用奠定了基础；约瑟夫逊效应（超导隧道效应）的发现则开辟了超导电子学的新领域，显示了超导电性在微电子学方面应用的广阔前景；与此同时，为超导服务的致冷技术也获得了长足的进展。所有这些，促使一门新兴的技术——超导电技术迅速发展起来了。

目前，超导技术的应用越来越广泛，其中用得最大量、最有成效的就是超导磁体。超导磁体具有轻便、费用低、易于在很大空间内获得高场强均匀的或高梯度的磁场等一系列优点，使它可以在许多科学技术领域中发挥重要作用。与日益增多的对各种超导磁体的需要相比，论述超导磁体设计理论和工程技术应用的专著显得太少。关于超导电性，已有不少名著，可惜它们大多数都是物理学家们从物理学的观点出发写成的。因此，科技工作者需要一本指导实际设计和应用的参考书。基于这样的考虑，我们参考了具有丰富实践经验的英国卢瑟福实验室M.N.Wilson著的“Superconducting Magnets”一书，编译了这本小册子，希望它能对读者有所帮助。

由于水平有限，编译工作又是在繁忙的教学和科研间隙中进行，书中定有许多错误和不足之处，热诚欢迎读者批评指正。

编译者

1988年3月

符 号 表

符号	名称	第一次出现章节	符号	名称	第一次出现章节
a	半径	3.1	E	螺线管误差系数	3.1
a	薄板半宽度	6.8	E	椭圆积分	3.5
A	磁矢势	3.5	E	电场	5.4
A	横截面积	5.3	E	能量	4.1
b	外半径	3.1	f	瞬态传热函数	6.9
B, B	磁场(磁感应强度)	1.1	f	磁通匝连系数	8.4
B_w	线圈最大磁场	3.1	f	传热百分率	11.1
B_0	线圈中心磁场	3.1	F	螺线管磁场系数	3.1
B_0, B_0	螺线管内、外半径处的磁场	4.1	F	变量	3.2
B_1, B_0	内、外偶极磁场	4.2	F, F	力	4.1
B_m	振荡磁场峰—峰值间的振幅	8.1	F_{pc}	磁通钉扎强度	12.1
B_p	穿透磁场	8.2	g	线性电流密度 $A \cdot m^{-1}$	3.2
c	穿透半径	7.3	G	超导体单位体积的欧姆热	5.4
C	比热	5.2	G_c	临界温度 θ_c 时的发热	5.4
C_p	常压气体比热	11.1	G	吉布斯自由能	12.1
C_L	蒸发潜热	6.9	h	传热系数	6.1
d	超导体内热传导特征距离	6.8	h	归一化外磁场	8.2
D	扩散率	7.4	h	高度	10.3
D	水力直径	6.10	H	焓	5.2
e	归一化能量	5.5	H	传热通量	6.3
e	椭圆长短轴之比	8.2	H, H	磁场	8.1
			i	I_c/I_0	7.3

I	电流	3.2	q	单位面积的热	6.9
I_c	临界电流	4.4	Q	单位体积的形变能	5.6
J_m	磁体电流	5.4	Q	单位体积内的热能	6.9
i_c	传导电流	8.2	O	每个循环中单位体	
$J_0 I_1$	修正Bessel函数	6.8		积的交流损耗	8.1
J, J	电流密度	1.1	r, r	半径	3.3
J_c	临界电流密度	1.1	R	半径	3.5
J_{c0}	θ_0 时临界电流密度	5.5	R_g	发热区半径	5.5
J_m	磁体电流密度	5.5	R	电阻	9.2
$J_0 J_1$	Bessel函数	7.6	s	偶极绕组的厚度	3.2
k	热导率	5.3	S	热流函数	6.2
k	耦合系数	9.7	t	变化时间	6.9
K	椭圆积分	3.5	t	归一化时间	9.4
K	力函数	4.1	T	圆筒方向张力	4.3
l	螺线管长度的一半	3.1	T	时间	6.9
l	长度	5.3	T_m	磁场上升到 P_m 所需	
l	交替扭转螺距	8.5		时间	8.3
L_0	洛伦兹数	7.4	T_Q	特征时间	9.4
L	电感系数	8.1	u	径向位移	4.1
L	扭转螺距	8.3	i	C_p/C_L	11.1
m	磁矩	8.1	U	保护函数	9.1
m	归一化磁化强度	8.2	v	失超传播速度	9.3
$\dot{m}$	质量流率	11.1	V	体积	3.1
M, M	磁化强度	3.5	V	势差	9.1
M	力函数	4.11	w	减小的径向位移	4.1
M	弯曲力矩	4.2	w	低温漏热	11.1
M	互感	9.7	w	复合套管的厚度	8.3
n	细丝数	8.4	W	功率	10.1
N_r	态密度	12.1	W_r	致冷功率	11.1
p	穿透深度	7.1	x	横向导体的位移	5.5
P	冷却周长	6.1	X	超流热流函数	6.7
q	损耗(交流损耗)	8.1	y	归一化温度	5.5

• II •

Y	杨氏模量	4.1		氦池温度	5.2
Y_0, Y_1	第二类Bessel函数	7.9	Θ	导体的绝对温度	6.10
z	距离, 常用来表示 沿着超导体的径向 距离	5.5	κ	金兹伯-朗道常数	12.1
z	交换长度参数	11.1	λ	超导体在复合线中 占的体积率	5.4
Z_2	引线长度	11.1	Λ	特征长度	10.1
α	螺线管的内外半径 之比	3.1	μ_0	自由空间的导磁率	3.1
α	最小传播区的方向 比率	5.3	ν	泊松率	4.1
α	横向速度与轴向速 度之比	9.3	ν	传热稳定化因数	7.5
β	螺线管长度与内半 径之比	3.1	ρ	曲率半径	4.3
β	稳定化参数	7.2	ρ	电阻率	5.3
β	磁场比 B_m/B_p	8.1	ρ_{eff}	有效横向电阻率	8.3
γ	密度	5.2	σ	拉应力	4.1
γ	索末非常数	12.1	τ	时间常数	8.3
Γ	损耗函数	8.1	ϕ	角	3.3
Δ	能隙	12.1	ϕ	磁通量	7.1
e	归一化半径 r/a	4.1	χ	角	3.5
e	形变	7.6	χ	扭转复合线的螺 旋角	8.3
η	热扩散率对磁扩散 率之比	7.7	ω	角频率	8.3
η	瞬态传热函数	6.9			
θ	角	3.1			
θ	绝对温度	1.1			
θ_c	临界温度	1.1			
θ_s	在复合线中开始发 热的温度	5.2			
θ_0	基本温度-常指液				

目 录

符号表	(1)
第一章 概论	(1)
第二章 应用——现状和未来	(5)
2.1 供研究用的磁体	(5)
2.2 高能物理中的磁体	(6)
2.3 受控热核反应	(8)
2.4 磁流体发电	(8)
2.5 直流电动机	(9)
2.6 交流电机	(10)
2.7 能量贮存	(11)
2.8 磁分离	(12)
2.9 磁悬浮	(13)
2.10 核磁共振成像	(14)
第三章 磁场的形状和绕组的构成	(16)
3.1 螺管线圈	(16)
3.2 横向磁场线圈	(23)
3.3 圆环线圈	(28)
3.4 磁镜	(29)
3.5 数值法	(30)
第四章 电磁力和应力	(36)
4.1 螺管线圈中的力	(36)
4.2 偶极子线圈中的力	(42)
4.3 圆环线圈中的力	(47)
4.4 超导材料的机械性质	(49)

4.5	结构材料的机械性质	(54)
第五章 退化和磁锻炼 (61)		
5.1	扰动谱	(62)
5.2	分散扰动	(64)
5.3	点扰动	(67)
5.4	复合导线	(68)
5.5	最小传播区——MPZ	(71)
5.6	机械扰动	(76)
5.7	尺寸影响	(80)
第六章 低温稳定 (82)		
6.1	沸腾传热	(83)
6.2	热传导和等面积原理	(85)
6.3	正常金属的电阻率	(89)
6.4	两个实用例子	(93)
6.5	沸腾传热的改进	(95)
6.6	窄通道影响	(96)
6.7	用超流氦冷却	(97)
6.8	有限超导尺寸的影响	(99)
6.9	瞬态影响	(104)
6.10	强迫冷却	(111)
6.11	点扰动	(117)
6.12	最大允许扰动	(120)
第七章 磁通跳跃 (122)		
7.1	屏蔽电流和临界态模型	(122)
7.2	磁通跳跃的绝热理论	(124)
7.3	复合线、扭转复合线和自场效应	(127)
7.4	热扩散和磁扩散：特征时间	(134)
7.5	板的动态稳定：薄带导体	(136)
7.6	导线的动态稳定：自场效应	(140)

7.7	考虑有限热扩散率时的动态理论	(144)
7.8	有限根丝的尺寸效应	(146)
7.9	导体设计的小结和结论	(149)
第八章	时变场和交流损耗	(150)
8.1	计算方法	(150)
8.2	超导体的磁滞损耗	(153)
8.3	横向磁场中的复合线	(166)
8.4	损耗计算实例	(175)
8.5	轴向磁场中的复合线	(181)
8.6	自场损耗	(188)
8.7	结论	(191)
第九章	失超和保护	(193)
9.1	温升	(194)
9.2	电压	(196)
9.3	传播速度	(197)
9.4	电阻增长和电流衰减	(202)
9.5	外电阻保护	(211)
9.6	次级耦合保护	(214)
9.7	分段保护	(220)
9.8	结论	(224)
第十章	测量技术	(226)
10.1	临界传导电流的测量	(226)
10.2	磁化强度测量	(236)
10.3	测量与温度的关系	(242)
10.4	稳定性测量	(243)
10.5	失超传播速度的测量	(243)
10.6	交流损耗测量	(244)
10.7	磁场测量	(247)
第十一章	供电装置	(248)

11.1	电流引线设计	(248)
11.2	持续电流开关	(264)
11.3	超导电源	(267)
第十二章	超导材料及其加工	(270)
12.1	超导体的基本性质	(270)
12.2	铌钛	(278)
12.3	铌三锡	(286)
12.4	高性能材料	(294)
12.5	强电流超导体	(298)
第十三章	磁体设计——某些实用细节	(303)*
13.1	小磁体	(303)
13.2	中型偶极子磁体和四极磁体	(310)
13.3	大磁体	(315)
	参考文献	(319)

第一章 概 论

超导电性是某些金属被冷却到极低温度时所呈现的一种奇异现象。它是荷兰物理学家卡末林·昂尼斯 (Kammerlingh Onnars) 在1911年首先发现的。一般地说, 金属的电阻是随温度逐渐变化的, 但是昂尼斯在研究了某些金属之后 (如铂、水银和锡) 发现: 当温度低于某一温度时, 金属的电阻突然消失为零。我们称这一温度为该金属的临界温度 θ_0 。 θ_0 是极低的, 一般金属的 θ_0 仅几K, 如水银的 θ_0 为4K, 锡的 θ_0 为3.7K。昂尼斯所以能发现超导电现象, 是由于三年前他在实验室里成功地发明了液化氮技术的结果, 这说明技术的发展往往能为科学的重大发现铺平道路。

昂尼斯在提出超导现象之后很快地就意识到他的发现可能为科学技术带来重大变革, 一种既能产生强磁场又不消耗功率的磁体将会出现。但是, 他不久又发现超导现象除了与 θ_0 有关外, 还与磁感应强度 (简称磁场) B 有关; B 高于某个值, 不管温度如何, 处于超导态的物体——超导体将从超导态转变为正常态, 这个磁场值被称为临界磁场 B_0 。昂尼斯研究过的铂、水银等金属的 B_0 只有几百高斯, 鉴于这一事实, 他曾感到失望。几年以后, 超导的许多其他性质相继发现, 这使人们对超导的本质有了新的认识。60年代初期, 著名学者马赛尔斯 (Matthias) 和库斯纳 (Kunzler) 发现了一类高临界磁场 B_0 的超导材料, 这些材料不象昂尼斯研究的纯金属材料, 它们不仅在高磁场情况下仍然保持超导态, 而且能运载极大的电流。这是一个极重要的突破, 它使得昂尼斯的预言经过50年才变为现实。

图1.1表示铌钛材料的超导性能不仅与 θ_0 和 B_0 有关, 而且与

临界电流密度 J_c 有关。 θ_c 、 B_c 、 J_c 组成一空间临界曲面，曲面之内为铌钛的超导态，曲面之外为正常态。从图中还可以看出，这三个量中的任何一个量的增加，都会使其它两个量减小。铌钛的 θ_c 为9.3K，假如超导体工作在这一温度，那么 B_c 和 J_c 都已减小到零，这是毫无意义的。

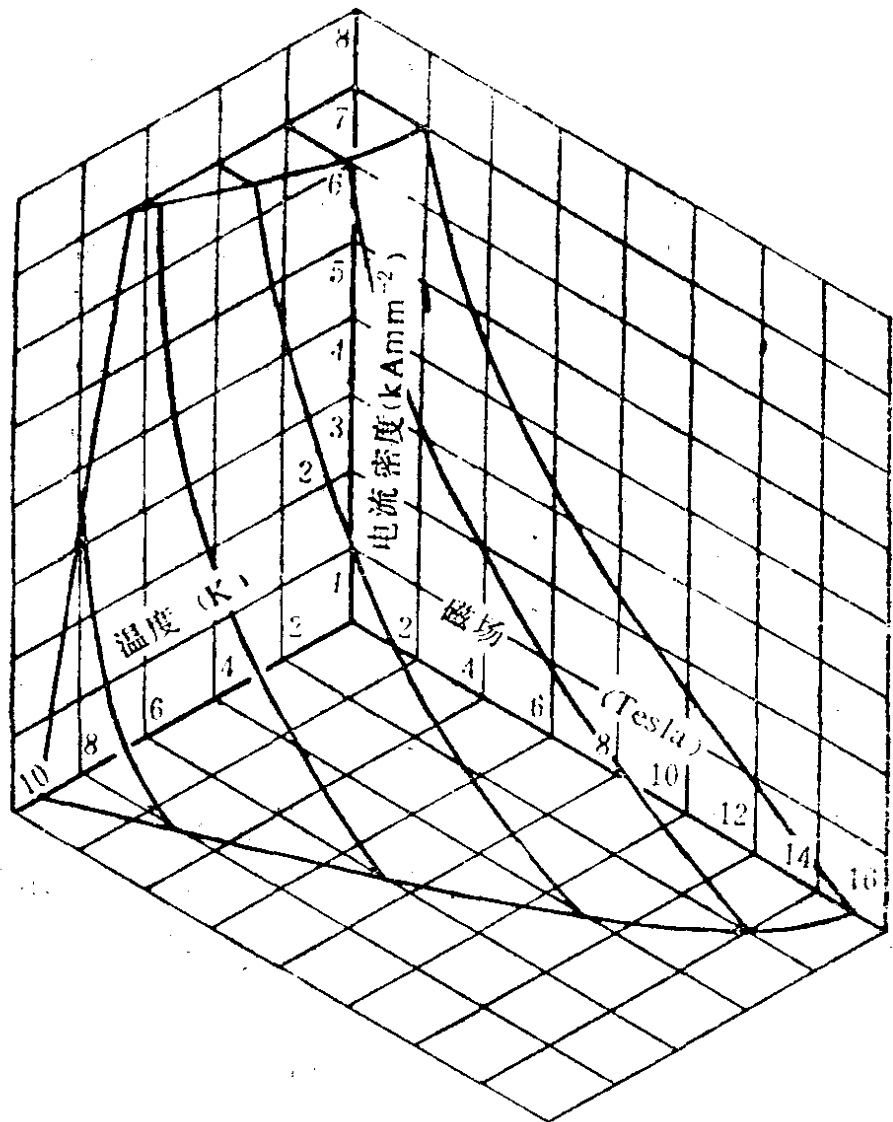


图1.1 商品超导合金铌钛在4.2K时的临界电流曲面

超导磁体一般都在4.2K的液氦温度中工作。图1.2表示铌钛和铌三锡在这一温度时通过临界曲面的“切片”。从图中看到，铌三锡材料优于铌钛材料，但前者加工困难。图1.2阴影区表示的电流密度在日常生活中是极其一般的，如户内配电线的电流密度 J 为 10^7 A m^{-2} ，当它增加到 10^8 A m^{-2} 时，导线丝就会熔断。常规磁体是水冷磁体，它是由在 $J \approx 10^7 \text{ A m}^{-2}$ 情况下工作的铜线构

成，为了减小水冷磁体的安匝数，一般采用软铁铁轭增加磁场 B 。铁磁材料大约在磁场为 2T 时饱和，因此常规磁体的工作范围限制在阴影区以内。但是常规磁体也能获得比较高的 B 和 J ，这需要大量的冷却水，其功率损耗就会大大增加，如著名的比特 (Bitter) 磁体就是这样设计的。而超导磁体所需的唯一功率是冷却磁体到低温的制冷功率和向磁体励磁的小电流源。

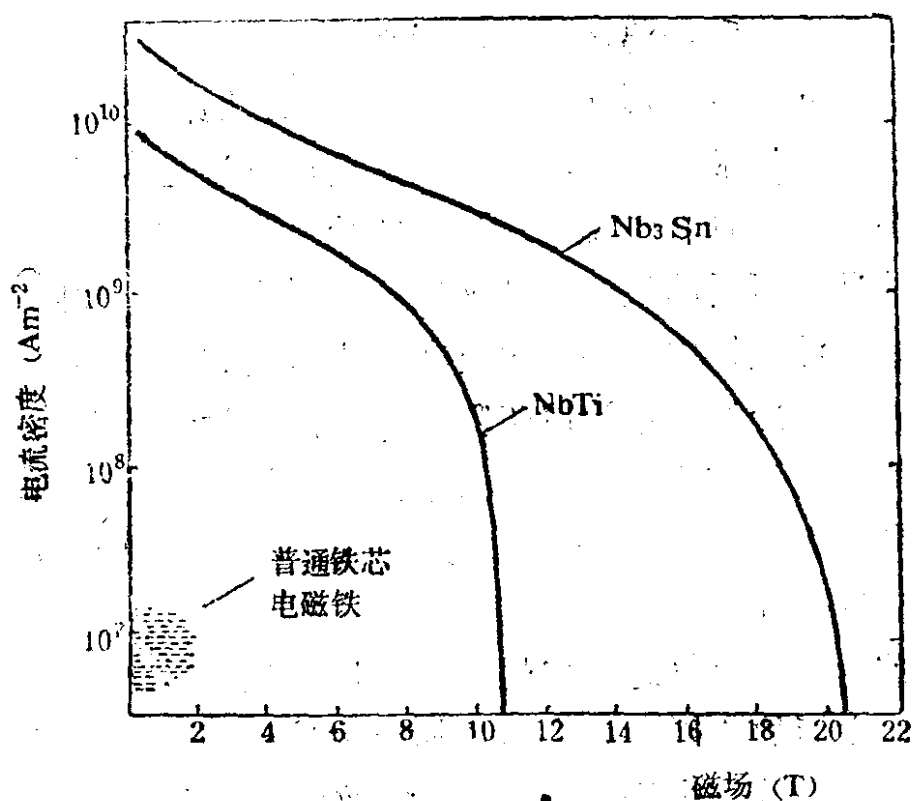


图1.2 两种常用超导体铌钛和铌三锡在 4.2K 温度的临界曲线；
左下方阴影区是普通铁芯电磁铁的工作范围

在高场值的超导材料发现之后，超导磁体比常规磁体具有更好的性能。在安匝一定时，它能在高电流密度下运行，也就是说，用比较少的安匝达到同一场值。超导磁体除了磁体小巧、重量轻、投资省、运行费用低外，它已经成功地产生了高梯度磁场。正是由于上述原因，超导磁体的应用越来越广泛，几乎涉及所有领域。

就全书而言，我们只简单地把超导体本身看作为一种性能已知的工程材料，没有力图去解释超导电性的来源或给超导的许多

特点进行一个全面的叙述，这样做的目的便于把注意力集中到超导性能的充分利用上。如果读者想了解超导电性方面的内容，可以参阅格拉斯 (Grassie, 1975)，罗斯-英尼斯 (Rose-Inness, 1969) 写的超导电性。

从运行的角度看，保持低温条件是很重要的，为此超导磁体必须放在装有液氮的容器或恒温器中，这些容器是一种用真空绝热的容器，在室温和低温区域之间通常有一个液氮冷却屏蔽区。低温容器有不同的设计形状，从图2.1表示的杜瓦到图2.6表示的比较复杂的一次输液型。后者的优点是允许室温进入高场区。高场区是充满液氮的管状恒温器，但它的价格高，装配困难。小型实验室磁体装置所需的液氮常从液氮存储罐中得到，它既可以由临近的实验室液化器中得到，也可在商店里买到，大型磁体系统有自己的液氮制冷机。不论属于哪一种情况，设计一个长期可靠的运行制冷系统是相当重要的。关于制冷和恒温器的详细情况，读者可参考伯恩 (Burron, 1966)，克罗夫特 (Croft, 1970) 和怀特 (White, 1979) 写的书。

到目前为止，尽管超导电性主要应用于超导磁体，但是它还有许多其他方面的应用，如电力传输或大功率微波谐振腔的连续运行；用超导的约瑟夫逊 (Josephson) 效应制成各种灵敏的传感器；计量基准和超快速计算机的存贮元件等。如果读者想了解这方面的应用，可参考应用超导电性会议的论文集。

第二章 应用——现状与未来

超导电性是在物理实验室里发现的，因此最先在这里应用也是很自然的。不论是在物理实验室还是在高能物理实验室中，超导磁体的应用都被看作是一种极为重要的研究手段。不仅如此，超导磁体系统已开始应用到其他领域，许多大的超导磁体系统正在设计和建设，未来的发展是确信无疑的。由于篇幅的关系，这里我们仅就研究用的超导磁体和它在科学、工程、医疗中的应用前景作一简要的概况介绍。

2.1 供研究用的磁体

在那些需要强磁场的实验科学中，超导磁体现正得到越来越广泛的应用，其原因是它的价格和运行费用比常规磁体便宜，体积更小，而获得的磁场却比常规磁体高。现在包括低温杜瓦在内的超导磁体系统已成为商品，可以在市场上买到，场值为5—15T，整个容积为1/100—1L。图2.1表示一种典型的超导磁体，线圈大多数是圆柱形，为了获得均匀磁场，通常把线圈分成两半。这种磁体广泛地应用在磁光效应、Mossbauer效应、核磁共振、电子显微镜的高分辨棱镜和固体物理的若干领域。在核磁共振仪器中，要求磁场在空间的分布极其均匀，并在时间变化时保持恒定不变。超导磁体只要在持续方式(Persistent Mode)下运行，这种要求是很容易满足的。换句话说，当磁体电流达到所需磁场值的要求时，用超导开关短接磁体的电流引线，根据电磁感应定理，短路前的磁体电流可以继续由超导开关组成的闭合回路里流动。由于回路的电阻为零，因而回路中的电流不会衰

减，因此磁场保持稳定不变，即成超导永久磁体。关于持续电流技术将在第八章中详细讨论。

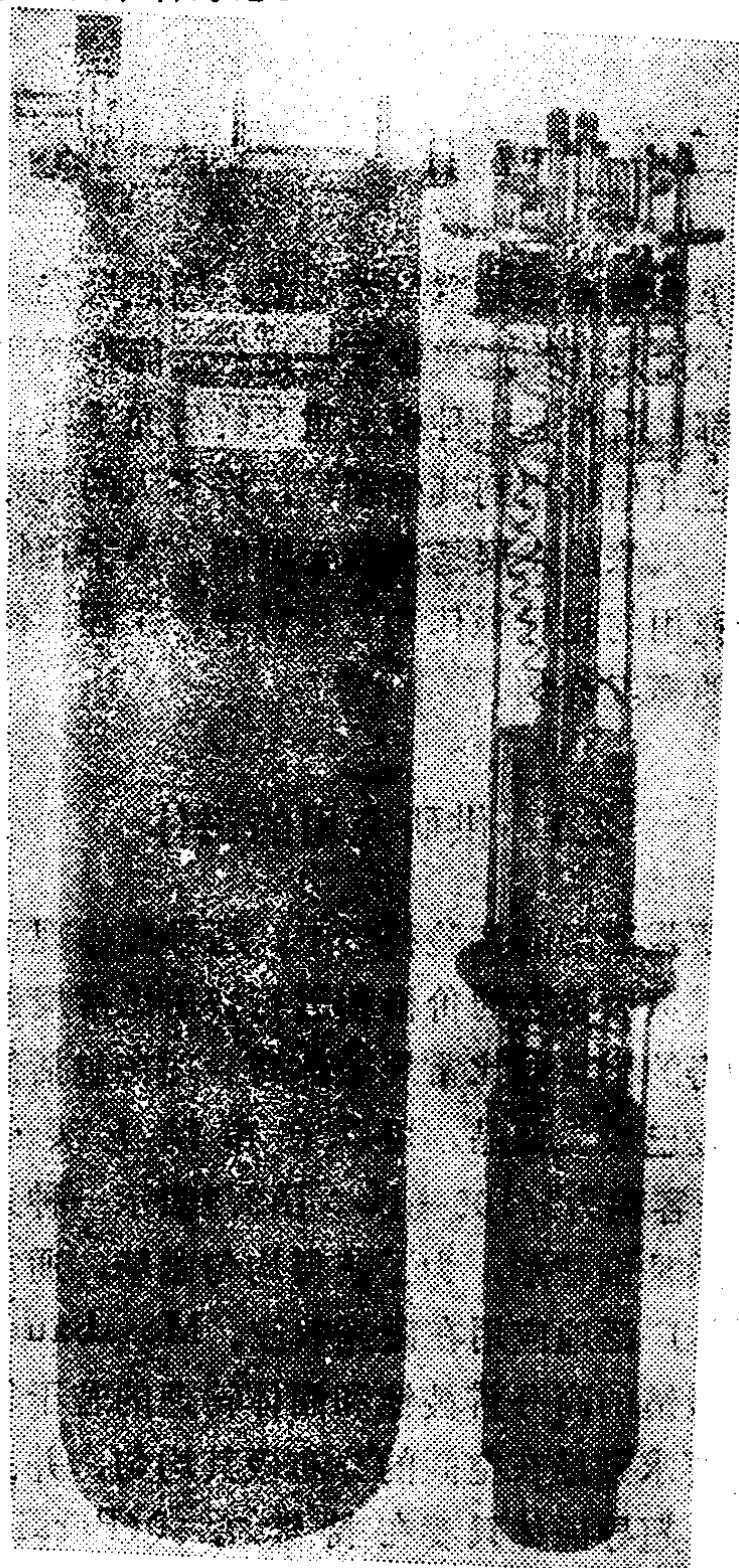


图2.1 研究用的小型超导磁体和它的杜瓦

2 2 高能物理中的磁体

自70年代以来，强磁场在高能物理中的应用得到新的发展。

人们利用强磁场来加速、聚焦、控制和分析构成物质基本结构的高能粒子束，一个大的高能物理实验室往往要消耗100MW的电功率，其中大部分功率用在常规磁体产生磁场。近年来，超导磁体在这一领域的应用发展很快，其主要原因是它既能节省电能又能产生强磁场。在高能物理中，研究粒子间的碰撞通常是在气泡室中进行。这种气泡室把带电粒子的轨迹视为一系列的微小气泡，精确地知道每个粒子的能量对研究高能物理是很有用的，它可以通过在磁场中计算粒子轨迹的曲率得到。为了在气泡室中产生磁场，就需要一个很大的磁体。现在，这些磁体几乎都是超导磁体，因为它的价格比常规磁体便宜（这里的常规磁体费用包括电源和磁体的冷却费用），超导磁体的运行费用也比常规磁体的低。在欧洲原子核研究中心(CERN)建造的气泡室磁体，是世界上至今最大的超导磁体，磁体由二个内径为4.7m，彼此相距0.5m的线圈组成。粒子束从垂直方向进入气泡室磁场，磁体的中心场值为3.5T。如果用常规磁体产生同样的磁场，需要60MW的电功率，而超导系统仅需要一个900W的制冷系统。在室温条件下，要维持这一制冷系统正常工作，也只要360kW的电功率。

加速器磁体是比较小的磁体，美国费米实验室建立的500GeV质子同步加速器是一个直径为2km的圆环，共由1000多个小磁体组成。加速器磁体有两个特点：一是磁场的增加必须与粒子能量的增加保持同步（在第八章将会看到，磁场的变化会引起超导体电阻的微小变化和能量损耗）；二是用磁场来约束粒子束使其作圆周运动。因此，对粒子束而言，磁场必须是横向的，要么场值很均匀，要么梯度场很均匀，简单的螺管线圈无法满足这些要求。为此，人们就发展了一种特殊的产生横向磁场的线圈结构，这种结构将在下一章描述。尽管目前还存在着一些困难，但二个超导加速器工程项目正在建设，一个在费米实验室，另一个在美国的布鲁克海文实验室。