

沈云宝 编著

超导电机

Superconducting

machines

浙江大学出版社
ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

超 导 电 机

沈云宝 编著

浙江大学出版社

(浙)新登字10号

内 容 简 介

超导电机是当今工业大国竞相研究、开发的一种技术难度较高的新型电机。本书主要讨论超导汽轮发电机。其主要内容有超导汽轮发电机的详细结构、工作原理、稳态和暂态特性,以及电磁场分析、参数计算等设计基础。为了使超导与电机联成一起,自成系统,书中也阐述了超导机理、超导线材、低温技术及超导的应用等。

本书可供研究单位、高等院校和工矿企业等单位中从事与超导电机研究、开发和应用工作有关的科技人员阅读;也可作理工院校的研究生教材或有关专业师生的参考书;对超导电机或超导技术感兴趣的读者也不失为了一本良好读物。

超 导 电 机

沈云宝 编著

责任编辑 龚建勋

* * *

浙江大学出版社出版

浙江大学印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

开本850×1168 1/32 11.625印张 字数291千字

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数: 0001~1500

ISBN 7-308-00960-2

TN·025 定价: 3.80元

前 言

从1911年发现超导电现象至今的半个多世纪来，超导技术无论在理论还是实践上都取得了长足进展。尤其在1986年后，高临界温度（77~100K以上，进入液氮温区）超导材料获得突破性进展，从而打开了超导技术广泛应用的大门。可以预见，在下个世纪中超导技术将会给电力、电子等工业领域，以及矿冶，交通运输和医疗等广泛领域带来根本性的巨大变革。

近二十几年发展起来的超导电机是超导技术中效益明显的重要应用之一。它具有高效、节能、省材和重量轻等突出的优点，是未来大型电机的发展方向。目前世界上已制造出30万kVA容量的大型超导汽轮发电机，并已并网。超导电机中有许多不同于传统的常导电机的理论和技术需要让人们了解、掌握和发展。它们尽管已散见于众多的论文中，但是专门论述超导电机的书籍却廖廖无几。作者有机会从70年代开始就参加超导电机的研究工作，经历了我国第一台超导汽轮发电机设计、研制和试验工作的全过程，积累了一定的科研实践经验和搜集到不少有关技术资料和文献。为了促进超导电机今后的研究和研究生教学工作的需要，作者撰写了此书，以抛砖引玉。

书中在阐述超导电机的理论和实践时，充分介绍了我国超导电机的研究成果，这是本书的特色之一。为了让读者能掌握一定的超导理论和技术，本书的前三章介绍了超导机理、超导线材和低温技术。这是十分必要的，尤其对于教学使用。它也是本书的另一特点。第四章介绍超导技术在各方面的应用，对于扩大读者的眼界和知识面也是需要的。最后四章则是关于超导电机的论述。这种体系能使超导理论与超导电机联成一个系统，前后呼应，

相互联系，有利于读者阅读和师生教学，是一种新的尝试。

最后，作者对为本书提供有用资料和数据单位和个人，一起参加超导电机研究工作的同行们，表示由衷的感谢。

限于作者水平，书中谬误和不足之处在所难免，敬请读者批评、指正。

作者于浙江大学

1991年10月

目 录

第一章 超导机理	1
1-1 金属的导电性.....	1
1-2 超导现象——完全导电性.....	4
1-3 完全反磁性——迈斯纳效应.....	9
1-4 超导相变及热力学性质.....	10
1-5 二流体模型.....	16
1-6 超导体的电磁性质——伦敦理论.....	19
一、超导体中磁场的透入——伦敦方程	19
二、超导体内的电流分布	22
1-7 非局域效应与相干长度——皮帕方程.....	23
1-8 超导体的中间态.....	24
1-9 磁通量子化.....	37
1-10 约瑟夫逊效应.....	39
1-11 超导微观理论——BCS 理论.....	40
第二章 超导线材	47
2-1 超导体的分类.....	47
2-2 理想的第二类超导体.....	50
一、磁化曲线	50
二、金兹伯—朗道方程	51
三、界面能	56
四、混合态的磁结构	58
五、临界磁场	60
2-3 非理想的第二类超导体.....	63
一、硬超导体的特性	63
二、钉扎效应及钉扎力	65
三、临界态——比恩—伦敦模型	70

四、磁通跳跃	72
2-4 超导体的不稳定现象	75
一、电流退化现象	75
二、低磁场下的不稳定性	76
三、锻炼效应	77
2-5 稳定化技术	78
一、动态稳定化	78
二、绝热稳定化	83
三、完全稳定的超导线	85
2-6 实用超导线	86
一、合金系超导线	86
二、化合物系超导线	89
2-7 交流超导线	90
一、弱磁场下的交流损耗	91
二、强磁场下的交流损耗	92
三、多芯细丝复合超导线的交流特性	97
第三章 低温技术	101
3-1 液氮	101
3-2 低温的获得	106
一、利用焦耳—汤姆逊效应制冷	106
二、膨胀机制冷	110
3-3 氮液化器	115
一、级联式氮液化器（林德型液化器）	115
二、带膨胀机的氮液化器（克劳德型液化器）	116
3-4 低温容器	118
一、贮液杜瓦容器	118
二、低温恒温器	119
3-5 低温测量	120
一、低温温度测量	120
二、液面测量	123

第四章 超导应用	126
4-1 电力方面的应用	126
一、超导电力电缆	126
二、超导变压器	134
三、超导限流器	135
四、超导储能装置	136
五、超导磁流体发电机	138
4-2 交通运输上的应用	141
一、超导磁浮列车	141
二、超导船舶推进	147
4-3 超导强磁的其它应用	148
一、超导磁分离装置	148
二、超导核磁共振成像(NMR-CT)装置	150
三、超导核磁共振(NMR)谱仪	153
四、热核聚变装置	154
4-4 超导的弱电应用	159
一、超灵敏的磁、电测量仪器	160
二、微波器件和红外探测器	163
三、超导快速信号处理器	165
四、计量标准	167
五、超导电子计算机	168
六、超导放大器	169
七、超导天线	172
八、超导磁屏蔽	174
九、超导陀螺仪	175
第五章 直流超导电机	176
5-1 概述	176
5-2 超导单极电机的结构	182
一、盘形超导单极电机	182
二、筒形超导单极电机	184

5-3	直流超导电机的磁场屏蔽	186
5-4	旋转集流装置	187
	一、常规电刷与集流环	188
	二、碳纤维电刷与集流环	189
	三、液态金属集电环	190
5-5	超导单极电机的励磁磁场计算	197
第六章	超导汽轮发电机的结构	200
6-1	超导汽轮发电机概述	200
	一、超导汽轮发电机的发展概况	200
	二、超导汽轮发电机的经济性	207
6-2	超导汽轮发电机的基本结构原理	207
6-3	定子结构	212
6-4	转子结构	222
	一、超导励磁绕组	226
	二、热辐射屏	229
	三、力矩管	231
	四、轴端热交换器	232
	五、真空绝热及密封	233
	六、轴向冷收缩的补偿结构	235
	七、电磁阻尼屏	237
	八、励磁绕组引线	239
	九、具有惯性转子部件的新颖转子结构	249
	十、具有超导转子外层的转子结构	251
6-5	氮运输装置	251
第七章	超导同步电机的电磁场及参数	256
7-1	超导同步电机磁场的两维解	256
	一、励磁磁场的分析	256
	二、电枢磁场的分析	265
7-2	超导同步电机磁场的三维解	271
	一、电枢磁场的分析	271

二、励磁磁场的分析	279
7-3 超导汽轮发电机中的磁场分布	282
7-4 电感计算	285
一、励磁绕组的自感 L_f	285
二、电枢绕组一相的自感 L_a	286
三、电枢绕组相与相间的互感 M_{ab}	286
四、励磁绕组与一相电枢绕组间的互感 M_{fa}	287
五、转子阻尼屏的自感系数 L_D / N_c^2	287
六、转子阻尼屏与励磁绕组间的互感系数 M_{Df} / N_c	287
七、转子阻尼屏与一相电枢绕组间的互感系数 M_{Da} / N_c	288
7-5 电抗计算	288
一、直轴同步电抗 x_d	289
二、交轴同步电抗 x_q	289
三、直轴瞬变电抗 x'_d	289
四、交轴瞬变电抗 x'_q	290
五、直轴超瞬变电抗 x''_d	290
六、交轴超瞬变电抗 x''_q	291
七、顺序电抗 x_1	291
八、逆序电抗 x_2	291
九、零序电抗 x_0	291
第八章 超导同步发电机的特性及转子阻尼、屏蔽系统 ..	292
8-1 超导同步发电机系统的数学模型	292
一、超导同步发电机的数学模型	292
二、电力系统的数学模型	296
三、发电机组的运动方程	297
8-2 相量图及容量、效率计算	298
一、超导同步发电机的相量图	298
二、容量、损耗及效率计算	303
8-3 超导同步发电机的稳态特性	306
一、空载特性 $E_0 = f(I_f)$	306

二、三相稳态短路特性 $I_K = f(I_f)$	307
三、负载特性 $V = f(I_f)$	307
四、发电机的电压变化率 ΔV	308
五、V形曲线 $I = f(I_f)$	308
六、稳态电磁力	309
8-4 超导同步发电机的暂态特性	312
一、电压上升特性	312
二、三相突发短路特性	315
三、故障排除的临界时间 t_c	317
四、暂态转矩及暂态电磁力	318
五、转子阻尼屏中的涡流损耗	323
六、短路故障引起的励磁电流变化	324
8-5 转子阻尼、屏蔽系统概述	325
8-6 转子屏蔽系统的电磁场分析	327
8-7 超导励磁绕组的屏蔽	333
一、屏蔽率 $s(f)$	333
二、屏蔽后的转子磁场阶跃响应	336
三、外磁屏及励磁绕组对转子屏蔽的影响	337
8-8 电机转子振荡的阻尼	339
8-9 超导汽轮发电机的实际数据	345
一、我国研制的超导汽轮发电机的数据	345
二、国外超导汽轮发电机的数据	347
参考文献	353

第一章 超导机理

1-1 金属的导电性

金属由晶格和电子组成。金属原子的核与束缚得较紧的一部分电子组成带正电的离子，这些正离子规则地排列成晶体点阵，称为晶格。而原子中的其余电子（即价电子）则可在晶格中自由地运动，称为传导电子（或自由电子）。如果每个离子都位于晶格中规定的位置上固定不动，按照金属的自由电子模型（或称电子气模型），可把传统电子看作象理想气体一样，能在金属内完全自由地运动，不受任何阻尼，只有动能没有势能，也即不存在电阻。在电场作用下，自由电子气体发生移动，就形成电流，金属中的电流即来自传导电子的运动。这时，金属中电流的电阻为零。

以上只是理想的状态，实际情况是传导电子与晶格会出现碰撞（即电子散射）现象，这就会产生电阻。在没有电场时，金属中传导电子的运动完全是无规则的，它不断与晶格碰撞，每次碰撞后运动方向都会发生突变。经多次碰撞后，传导电子基本上还是在原来的位置，并不沿某一方向移动，这种运动称为电子的热运动。

接连两次碰撞之间电子所走过的路程称为电子的自由程。在多次碰撞中，电子自由程的平均值称为平均自由程，以 l 表示。 l 随不同金属而异，且与温度 T 有关，例如铜在300K时， $l \approx 3 \times 10^{-8} \text{m}$ ，在4K时， $l \approx 3 \times 10^{-3} \text{m}$ 。设 v 为电子的平均速率，则接连两次碰撞间的平均时间间隔（称弛豫时间）

$$\tau = l/v$$

v 的数量级是 10^6 m/s, 因此对于铜有: 300K 时, $\tau \approx 3 \times 10^{-14}$ s; 4K 时, $\tau \approx 3 \times 10^{-9}$ s。 l/τ 即为每秒内碰撞的次数。

当存在外电场 $\vec{E}$ 时, 金属中的传导电子受到电场 $\vec{E}$ 的作用, 除作热运动外, 还将沿着与电场相反的方向移动, 其速率 v_d 比平均速率 v 要小得多, v_d 的数量级是 10^{-4} m/s。故在通常情况下, $v_d \approx 10^{-10} v$ 。

电子在电场中受到的力为 eE , 若其质量为 m , 则其加速度

$$a = \frac{eE}{m}$$

设电子在一次碰撞后, 速率为零, 则在下一次碰撞前的速率为 $a\tau$ 。这个平均速率就是电子的移动速率

$$v_d = \frac{1}{2} a\tau = \frac{1}{2} \times \frac{eEl}{mv}$$

垂直于电子移动方向取一单位面积, 则单位时间 (秒) 通过这个面积的电量就是电流密度

$$J = Nev_d = \frac{1}{2} \frac{Ne^2El}{mv} = \frac{Ne^2\tau}{2m} E$$

式中 N ——单位体积内的传导电子数。

上式可写成

$$J = \sigma E \quad (1-1)$$

即为欧姆定律。其中系数

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{Ne^2l}{mv} = \frac{Ne^2}{2m} \tau \quad (1-2)$$

称为金属的电导率。其倒数 ρ 即为电阻率。

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2mv}{Ne^2l} = \frac{2m}{Ne^2\tau}$$

以上说明金属的电阻来自其传导电子与晶格的碰撞（又称电子散射）。而这种碰撞是由以下三种原因造成的：（1）晶格的振动（原子热振动，温度越高，杂乱的热振动越是剧烈）；（2）晶格存在的各种缺陷（如空位、填隙原子、位错等）；（3）杂质的存在（纯度再高的金属也无可避免）。散射的结果使传导电子与晶格间产生能量及动量的交换，这便是金属电阻的起因。

显然，第一种原因所引起的电阻与温度有关，即温度越高，电阻率就越大；第二及第三种原因所引起的电阻则与温度无关，而分别与金属的结构及纯度有关，缺陷及杂质越多，碰撞越频繁，时间 τ 越短，因而电阻率越大。由此可见，在室温区（ $\approx 300\text{K}$ ），金属的电阻主要来自晶格振动引起传导电子受到碰撞，从而妨害了它的自由运动；而在低温区（液氮温度 $\approx 4\text{K}$ ），则是晶格的缺陷和杂质的存在对金属的电阻起主要作用。因此，金属的电阻率 ρ 系由两部分组成：

$$\rho = \rho_L + \rho_i$$

式中 ρ_L ——由于晶格振动所引起的电阻率；

ρ_i ——由于晶格缺陷及杂质所引起的电阻率。

显然， ρ_L 是随着温度 T 的下降而减小的，当 $T \rightarrow 0\text{K}$ （绝对零度）时， $\rho_L \rightarrow 0$ 。在杂质浓度很低的情况下， ρ_i 与 T 无关。这样，当 $T \rightarrow 0\text{K}$ 时， ρ 中只剩下 ρ_i ，因此称 ρ_i 为剩余电阻率，它完全是由于金属内部存在缺陷和杂质所引起的。低温下 ρ 与 T 的关系如图1-1中的虚线所示。

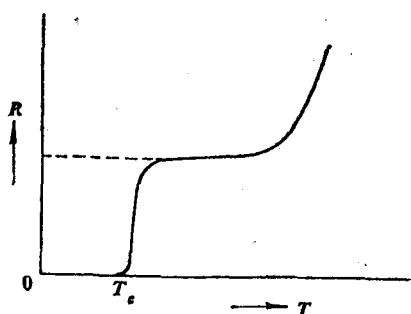


图1-1 低温下金属的电阻率

1-2 超导现象——完全导电性

按上述金属导电的一般(常导)理论来讲,即使金属内部毫无缺陷及杂质($\rho_i = 0$),也只有当 $T \rightarrow 0\text{K}$ 时才有 $\rho_L \rightarrow 0$,从而 $\rho \rightarrow 0$,也就是说只要温度在绝对零度以上,金属的电阻率总是大于零的。然而事实并非如此,1911年荷兰利顿(Leiden)大学的昂纳斯(H. K. Onnes)首先在实验中发现汞(Hg)在温度降到4.2K(液氮温度)时,电阻率很快降为零^[1],如图1-1中的实线所示。这种当物体在绝对温度零度以上就出现电阻率为零的现象称为超导(电)现象。具有这种超导电性质的物体称为超导体。

超导体具有电阻时的状态称为常导态或正常态,当温度降到一定数值以下时电阻突然消失后的状态称为超导态。超导电性开始出现时的温度,也即由常导态转变为超导态时的温度称为临界温度或转变温度,用 T_c 表示。

1957年美国麻省理工学院(MIT)的柯林斯(Collins)等人曾做过如下实验来测定超导体在超导态下的电阻值:即将铅(Pb)制成环状,并置于低温容器中,先外加一磁场穿过铅环内孔,然后降低温度,使 $T < T_c(7.23\text{K})$,铅环进入超导态后再移去所加外磁场。根据电磁感应定律,这时超导环中就感生出超导电流来,达几百安培。此电流就始终在环中流通,持续了两年半而未见其丝毫衰减,故称其为“永久电流”或“持续电流”。由此可以推算出超导态下的 $\rho < 10^{-21}\Omega\cdot\text{cm}$ 。1962年奎因(D. J. Quinn)等人^[2]用铅膜做成电感极小的圆筒($L = 1.4 \times 10^{-13}\text{H}$),只用了7个小时的观察时间,就得到超导态下 $\rho < 3.6 \times 10^{-23}\Omega\cdot\text{cm}$ 。这与铜(Cu)的 $\rho_{cu} = 10^{-7}\Omega\cdot\text{cm}$ 比起来,完全可以认为超导态下的电阻率实际上等于零,即超导体具有完全导电性。

除汞外,人们还发现不少其他金属,如铅(Pb)、锡(Sn)和铌

(Nb)等也都具有超导电性。同时还发现磁场对超导体的超导性质有着明显的影响。即在临界温度 T_c 以下时,如加上一定强度的外磁场后,可使超导体的超导态遭到破坏而转入具有电阻的常导态,如果去掉外磁场就恢复超导态。这个能使超导体的超导电性消失的最小磁场值 H_c 称为临界磁场。 H_c 的大小不仅随不同性质的超导材料而异,而且对于同一超导体, H_c 还与温度 T 有关。对于大多数超导体, H_c - T 的关系可以相当准确地用一抛物线方程来表示:

$$H_c \approx H_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c0}} \right)^2 \right] \quad (1-3)$$

式中 T_{c0} —— 零磁场下的临界温度;

H_{c0} —— 绝对零度(0K)时的临界磁场,一般约为0.03T左右。

为了方便,也可用约化温度 $t = T/T_{c0}$ 及约化临界磁场 $h_c = H_c/H_{c0}$, (1-3)式就成

$$h_c \approx 1 - t^2 \quad (1-3a)$$

由(1-3)式可画出 H_c - T 曲线如图1-2。图1-3则给出了几种超导金属元素实际的 H_c - T 曲线。表1-1列出了各种超导金属元素的临界温度 T_{c0} 和临界磁场 H_{c0} 值。

把Si、Ge、Se、Bi和Te等一些半导体或过渡金属蒸发在玻璃板上成为薄膜,当加上很高压力时,

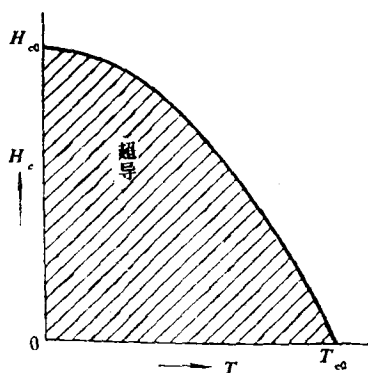
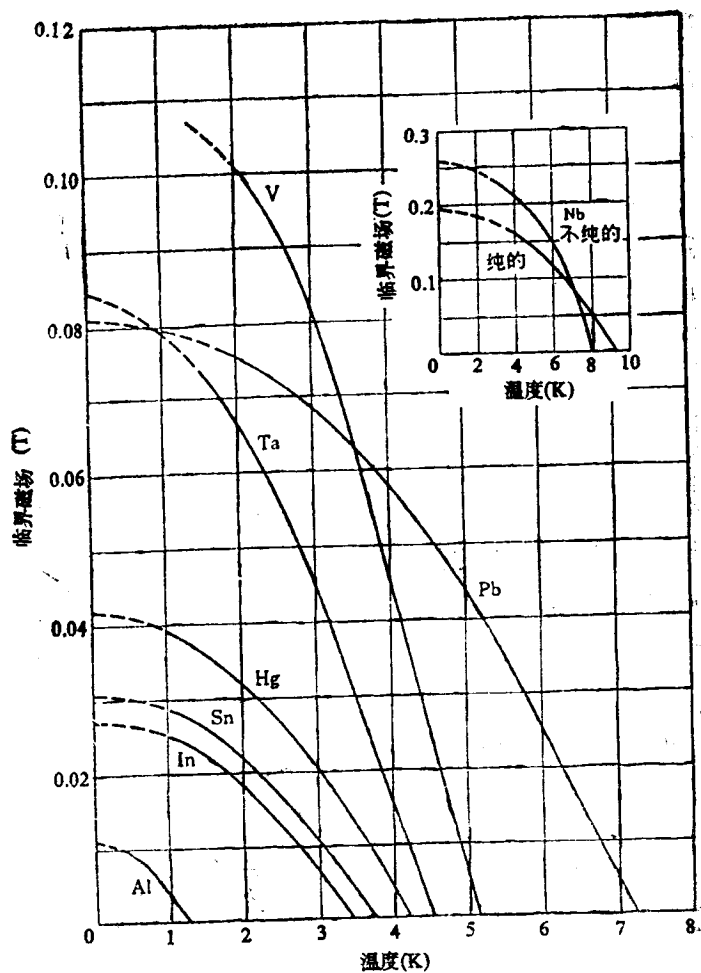


图1-2



1—Nb-25Zr; 2—Ti-25Nb-5Ta; 3—Nb-40Zr-10Ti;
4—Nb-48Ti; 5—Nb₃Sn。

图1-3