

超导低温技术与 粒子加速器

张新民 编著

科学出版社



32



超导低温技术与 粒子加速器

张新民 编著

科学出版社

1994

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了当今高新技术领域中的超导低温技术在粒子加速器中的应用,总结了这一领域的最新国际先进技术,是迄今为止该领域最系统的一本学术著作。

本书从超导体的基本特性到超导磁体和超导腔的设计以及低温技术都做了一定深度的探讨,对加速器原理、超导回旋加速器、超导同步辐射光源、超导扭摆磁体、探测器超导磁体也都做了简明的介绍。

本书对从事加速器、核探测器和受控热核装置研究,以及对从事低温超导应用研究的科技工作者都有重要的参考价值,对大专院校有关专业的师生也是一本很好的教学参考书。本书对我国低温超导技术的应用和粒子加速器的发展都将起到很好的推动作用。

超导低温技术与粒子加速器

张新民 编著

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

山东临沂新华印刷厂排版

北京怀柔县黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994年4月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1994年4月第一次印刷 印张: 12

印数: 1—700 字数: 267 000

ISBN 7-03-003817-7/O · 671

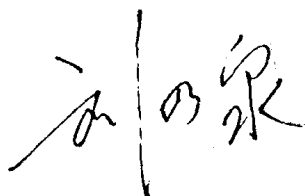
定价: 13.50 元

序 言

利用低温超导特性研制的超导磁体和超导腔,已在高能加速器、重离子加速器、电子直线加速器、小型同步辐射光源、高能探测器和受控热核装置等领域中得到实际应用。在我国超导腔、超导磁体等的实际应用也已经开始起步,预期不久的将来超导技术的应用在我国一定会有一个更大的发展。张新民同志在 80 年代末曾在原西德汉堡的国家实验室(DESY 研究所)参加过 HERA 工程低温系统的建造工作,并对超导技术本身及其在加速器中的应用做了深入和系统的研究。本书就是在这些研究和实践的基础上编写出来的。

本书从超导体的基本特性,到超导磁体和超导腔的设计以及低温技术都做了一定深度的探讨;对加速器原理、超导回旋加速器、超导同步辐射光源、超导扭摆磁体、探测器超导磁体也做了简明的介绍。

本书的出版对我国超导技术的应用无疑将是一个很好的推动。本书无论对加速器、核探测器或是受控热核装置领域工作的科技工作者,还是对从事超导应用研究的科技工作者,都有重要的参考价值。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely the name of the author or a related figure.

《超导低温技术与粒子加速器》一书,不仅对中国,对全世界都是一本非常重要的书,它一定能成功地在实验和工业之间架起一座桥梁。

Bjorn H. Wul

注:Wul教授是德国 DESY 研究所所长,曾主持建造了 HERA 对撞机的超导环。

• I •

前 言

自从发现超导电性以来,它就以其独有的特性受到广泛的重视。它在粒子加速器和高能物理研究领域的应用更是受到世界各国有关研究所和大学的高度重视。高能物理是研究基本粒子结构的主要手段之一,而加速器又是必不可少的工具。从 1911 年发现超导电性至今,经过世界各国科学家近一个世纪的不懈努力研究,超导电性在粒子加速器的某些方面的应用已进入实用阶段,例如已在运行的有使用超导谐振腔的直线加速器、超导回旋加速器、80 年代末德国 DESY 研究所建成的质子-电子对撞机的超导质子环。目前美国正在建造 $p\bar{p}$ 超导超级对撞机(SSC),德国 DESY 研究所正在研制 TESLA 电子直线对撞机。这些加速器的建成将使加速器技术进入一个崭新的阶段。

本书将系统地论述超导电性在粒子加速器中的具体应用,以及在实际应用中碰到的一些特殊问题,其中包括超导磁体系统、超导谐振腔系统、探测器超导磁体、超导回旋加速器、高场超导磁体、90 年代新发展的超导紧结构同步辐射加速器,以及必不可少的低温技术等。对于高温超导体在加速器中的应用,只在有关的章节中做一些简单介绍。希望本书能在超导电性和粒子加速器之间建立起知识的桥梁,对我国高能粒子加速器的发展起一个抛砖引玉的作用。

由于本书涉及学科范围较广,所以在章节安排和内容安

排上不仅要考虑到全书的整体性,而且也要考虑到各篇章(各学科)内容的相对独立性。例如,超导磁体的失超保护和电力、热应力等一些共性的问题,在本书中是以同步加速器中的超导磁体为例介绍的,在论述其它类型的磁体时就不再涉及这些内容。同时,各章尽量保持相对独立性,以使感兴趣于某些学科的读者可直接翻阅有关章节。为节省篇幅,有些内容只做简单介绍,但每篇后面尽量多地给出了有关的主要参考文献,以供读者需要时查阅。

正如前面所讲的,本书的内容涉及学科范围广,由于笔者本人水平阅历有限,错误缺点在所难免。希望读者和各学科的专家批评指正。

超导专家、国家超导专家委员会委员林良真教授,高能物理专家、高能物理所所长郑志鹏教授,清华大学原加速器教研室主任何文良副教授等分别审阅修改了有关章节或全书,并提出了宝贵的意见。加速器专家、中国科学技术大学副校长刘乃泉教授为本书写了序。

需要特别感谢的是作者本人的妻子白亚妮女士,她除完成自己的本职工作,主动承担了众所周知的重担外,还努力为作者提供了一个良好的写作环境,并在精神上、物质上给予了最大的支持和理解,帮助作者整理了图表。另外,作者本人过去的一些同事、同学为打印初稿、制图提供了极大的方便,在此一并表示衷心的感谢。

另外,在本书印刷过程中,曾与山东省临沂地区郑斯仁先生进行了多次技术性讨论,深表感谢。

目 录

第一章 加速器原理和超导物理基础	(1)
§ 1.1 加速器原理	(2)
1.1.1 加速器种类	(2)
1.1.2 均匀场回旋加速器的原理	(7)
1.1.3 同步加速器的原理	(10)
1.1.4 同步加速器的纵向动力学	(19)
1.1.5 同步加速器的强聚焦	(27)
§ 1.2 超导物理基础	(30)
1.2.1 第 I 类(纯金属)超导体的基本特性	(31)
1.2.2 第 II 类超导体的基本特性	(34)
1.2.3 超导理论简介	(36)
1.2.4 超导量子效应	(38)
§ 1.3 超导磁体实用超导材料	(41)
1.3.1 实用超导材料的种类	(41)
1.3.2 临界电流与磁场、温度和形变的关系	(44)
1.3.3 稳定性、退化和失超保护	(51)
1.3.4 交变电流和场损耗	(57)
主要参考文献	(60)
第二章 同步加速器超导磁体	(62)
§ 2.1 引言	(62)
2.1.1 失超、退化、锻炼	(64)
2.1.2 线圈中持久的涡流效应	(65)

2.1.3	铁扼	(66)
2.1.4	低温系统和材料	(66)
2.1.5	校正磁体	(67)
§ 2.2	超导磁体的磁场计算	(68)
2.2.1	单一载流导体的多级展开式	(68)
2.2.2	纯多极场的产生	(70)
2.2.3	斜谐波	(72)
2.2.4	电流壳组成的纯多极线圈的近似	(73)
2.2.5	铁扼的影响	(78)
2.2.6	铁扼的饱和	(80)
2.2.7	端部磁场	(82)
§ 2.3	机械精度和磁力	(85)
2.3.1	机械公差	(85)
2.3.2	磁力	(86)
2.3.3	线圈的预紧缩和内力	(90)
2.3.4	线圈和铁扼之间的力	(91)
2.3.5	线圈水平受力	(92)
2.3.6	线圈的制造和紧固	(92)
§ 2.4	超导磁体中的持久涡流	(94)
2.4.1	持久涡流作用的测量和对磁场质量的影响	(94)
2.4.2	超导体中持久涡流的计算模型	(95)
2.4.3	持久涡流的时间依赖性	(103)
§ 2.5	磁体的失超和失超保护	(105)
2.5.1	从超导态到正常态的跃迁	(105)
2.5.2	磁体的稳定	(107)
2.5.3	失超后线圈的热量	(112)
2.5.4	正常区域的传播速度	(115)
2.5.5	失超探测和外部的安全回路	(119)

2.5.6 一串磁体的保护	(121)
§ 2.6 校正线圈	(127)
主要参考文献	(132)
第三章 超导谐振腔	(134)
§ 3.1 引言	(134)
§ 3.2 腔的一些基础原理	(135)
3.2.1 腔的几何形状	(135)
3.2.2 腔的表面电阻、品质因数和分流阻抗	(140)
3.2.3 表面场	(143)
§ 3.3 超导腔	(144)
3.3.1 超导腔表面的射频电阻	(144)
3.3.2 基本的场限制	(147)
3.3.3 超导腔的实验方法	(150)
§ 3.4 超导腔的反常损耗	(156)
3.4.1 正常传导的微观缺陷	(156)
3.4.2 电子次级发射	(157)
3.4.3 电子场致发射	(161)
§ 3.5 用于超导腔的材料	(164)
3.5.1 铅	(164)
3.5.2 铌	(165)
3.5.3 高纯铌的优点和热不稳定性	(166)
3.5.4 A15 化合物 Nb_3Sn	(168)
3.5.5 微波场中的新型高 T_c 超导材料的特性	(172)
§ 3.6 主耦合器	(178)
3.6.1 射频发生器同有束流腔系统的匹配	(178)
3.6.2 主耦合器的要求	(186)
3.6.3 主耦合器的实例	(187)
§ 3.7 高次模(HOM)耦合器	(190)

3.7.1	HOM 耦合器的必要性	(190)
3.7.2	由一个聚束束流引起的场激励	(191)
3.7.3	Q_{ext} 的判据	(194)
3.7.4	HOM 耦合器的要求	(195)
3.7.5	HOM 耦合器的实例	(196)
§ 3.8	频率调谐	(199)
3.8.1	超导腔调谐的要求	(199)
3.8.2	可能的调谐方法	(201)
	主要参考文献	(204)
第四章 超导回旋加速器和超导紧结构同步辐射(SR)光源		
		(207)
§ 4.1	超导回旋加速器	(207)
4.1.1	超导回旋加速器特性介绍	(208)
4.1.2	主线圈设计方法	(210)
4.1.3	分离扇超导磁体	(212)
§ 4.2	无杂散场的超导引出通道磁体	(214)
4.2.1	无杂散场通道磁体的原理	(214)
4.2.2	磁场设计	(215)
4.2.3	超导磁通道磁体实例	(217)
§ 4.3	紧结构超导同步辐射光源	(222)
4.3.1	基本原理	(223)
4.3.2	圆形对称 SR 加速器主要参数	(226)
4.3.3	跑道形结构	(228)
4.3.4	超导弯转磁体	(233)
4.3.5	超导紧结构 SR 光源实例	(237)
	主要参考文献	(240)
第五章 探测器超导磁体、高场磁体和特殊磁体		
		(242)
§ 5.1	探测器超导磁体	(242)

5.1.1	大尺寸的探测器磁体	(243)
5.1.2	螺线管磁体的磁场计算	(246)
5.1.3	螺线管磁体的受力和储能	(252)
5.1.4	第一代和第二代超导螺线管	(257)
§ 5.2	加速器中的超导高磁场磁体	(263)
5.2.1	高磁场磁体的定义	(263)
5.2.2	高磁场磁体的发展实例	(267)
5.2.3	双通道“二合一”超导磁体	(271)
§ 5.3	同步电子环中的超导 Wiggler 磁体	(273)
5.3.1	Wiggler 磁体对电子环的控制	(274)
5.3.2	Wiggler 磁体和谐振自旋扩散	(277)
5.3.3	Wiggler 磁体对同步辐射光束的控制	(280)
§ 5.4	超导探测器	(285)
	主要参考文献	(287)
第六章	低温的获得及其部件实验	(289)
§ 6.1	低温热力学简介	(289)
6.1.1	低温流体的基本特征	(289)
6.1.2	低温热力学的宏观描述	(291)
6.1.3	理想制冷循环	(293)
§ 6.2	实际气体的制冷循环原理	(297)
6.2.1	实际气体	(297)
6.2.2	焦耳-汤姆逊效应	(297)
6.2.3	绝热膨胀制冷	(300)
6.2.4	氮液化器循环实例	(301)
§ 6.3	低温系统的技术设计	(304)
6.3.1	实用制冷剂的特性	(304)
6.3.2	实用低温材料的特性	(306)
6.3.3	热绝缘的设计	(314)

6.3.4	固体与液体和气体之间的热传导	(321)
6.3.5	制冷循环和设备	(323)
6.3.6	测试设备和过程控制	(326)
6.3.7	低温容器的泄漏	(328)
§ 6.4	超流氦的特性和实际应用	(330)
6.4.1	超流氦的实用热传播	(331)
6.4.2	超流氦的压力流冷却	(336)
6.4.3	使用超流氦系统的一些注意事项	(337)
6.4.4	超流氦制冷机实例	(339)
§ 6.5	闭路循环低温系统实例	(341)
6.5.1	低温系统的总体安排	(341)
6.5.2	超导环的冷却计算和实验结果	(344)
6.5.3	氦的输运管道	(354)
§ 6.6	超导设备使用的低温容器及低温泵效应	(357)
6.6.1	实用低温容器	(357)
6.6.2	低温泵效应	(364)
主要参考文献		(366)

第一章 加速器原理和超导物理基础

粒子加速器和超导技术本来是两个互不相干的科学领域。随着加速器技术的发展,被加速的粒子能量越来越高,对加速器直线段的谐振腔的射频功率需求和对储存环的 2 极磁体的磁场强度要求越来越高,对聚焦 4 极磁体的磁场梯度也要求很大。用常规材料所制造的谐振腔或者磁体,在技术上已越来越难以满足这些要求。另一方面,高能量的加速器的直径也变得越来越大,耗电功率也是主要困难之一。

面对以上这些主要困难,超导技术正好可以弥补这些不足之处。所以,从本世纪 70 年代起,世界上许多加速器和高能物理研究所以及大学的实验室都开始着手研究超导技术在这些方面应用的可能性。80 年代中期,用超导材料制造的超导磁体已经日趋完善,并且成功地应用在一些高能加速器上,例如德国的 DESY 研究所建造了第一个最大能量的质子电子对撞机,美国也已开始建造世界上最大的质子反质子对撞机。当然,超导电性在高能加速器上的应用只是其应用的一个方面,其它如超导磁体用于医学领域中的检查肿瘤的 CT 扫描机、用于提高火车速度的磁悬浮列车、用于提高计算机计算速度的超导电子大规模集成电路等。

本书由于篇幅所限,不可能很详细地介绍加速器,也不可能从头到尾介绍超导电性。但是,有关加速器原理和超导基础都已经有了许多专门的论著,感兴趣的科学工作者和研究人员

员可以进一步参阅有关的著作,这里只给出一些最基本的概括介绍。

§ 1.1 加速器原理

在任何圆形加速器中,粒子束流都沿着某个闭合轨道运动。因此,所有的圆形加速器都必须有一个垂直磁场,以使粒子轨道弯曲,而且还必须有一个或多个加速粒子束流的间隙。粒子的加速轨道经常不是一个真实的圆,例如大的同步加速器是由交替的直线段和弧形段组成的。圆形加速器的主要特征是高频加速磁场和粒子的运动频率必须同步。

粒子循环运行是谐振(resonant)圆形加速器的主要优点。在圆形加速器中,粒子多次通过同样的加速间隙(10^2 — 10^8 次),用低间隙电压(low gap voltage)便能够使粒子达到高动能。不管是圆形加速器还是直线加速器,束流能量超过50MeV/m时(加速器每单位长度获得的能量),无论在技术方面还是经济方面,常规磁体和常规高频腔都遇到了很大的困难。采用超导技术,这一困难便可以得到很好的解决。

现在让我们简单介绍现有加速器的类型,以及各种类型加速器的主要特点。

1.1.1 加速器种类

(一)回旋加速器

回旋加速器有恒定的磁场值和恒定的射频频率。束流的能量受相对论效应限制,此效应破坏了粒子轨道和高频场之间的同步。因此,回旋加速器仅仅用于加速离子。回旋加速器

的优点是,能够得到连续的束流微脉冲串(train of beam micropulses)。回旋加速器的特征是,从零能量到输出能量的离子都被约束在大面积磁场中。

1. 均匀场回旋加速器(uniform-field cyclotron)

均匀场回旋加速器有着重要的历史意义,它是用于核物理研究的第一台加速器,科学家们用它获得了若干兆电子伏的粒子束流。垂直磁场在方位角内(in azimuth)是均匀的。场的大小在径向几乎是常数,用很小的正场指数产生垂直聚焦。对于轻离子束来讲,能量限制大约是 15—20MeV,由质量的相对论增长和磁场沿半径的降低所确定。在均匀磁场回旋加速器中没有同步相位。

2. 方位角变化场(azimuthally-varying-field(AVF))回旋加速器

AVF 回旋加速器主要的改进是,在磁极辐向位置(periodic azimuthal position)周期性地增加楔形插入物。附加的水平场分量增加垂直聚焦。它同时产生一个平均负场指数(index),使平均磁场随半径增大,这个磁场变化平衡了粒子质量的相对论性增长,使粒子在加速器中以恒定旋转频率运动。由于这个特性 AVF 回旋加速器被称为等时(isochronous)回旋加速器。AVF 加速器的另一个优点是,强的垂直聚焦可获得高流强束流。甚至在低能的应用中,AVF 回旋加速器也已经代替了均匀场加速器。

3. 分离扇回旋加速器

分离扇回旋加速器是一种特殊的 AVF 加速器。它的辐向场的变化是通过弯转磁体分成几个扇得到的。分离扇加速器的优点是:1. 组合式磁体结构(modular magnet construc-

tion); 2. 可以在扇间安放高频馈送系统和加速间隙; 3. 粒子不能从低能量开始加速, 而必须用另外一台独立的加速器先将粒子加速到一定的能量, 再注入到分离扇回旋加速器中去, 这样可以很容易得到低发射度束流。

4. 螺旋线式回旋加速器

在螺旋线式回旋加速器中, 磁极衬垫有螺旋边界, 所形成的一定形式的螺旋线可用于标准 AVF 和分离扇加速器。在螺旋线式回旋加速器中, 边缘聚焦和散焦的联合效应引起一个附加垂直约束力。

5. 超导回旋加速器

超导回旋加速器成功地使用了前面所述的聚焦技术。超导线圈提供一个磁化力, 而超导线圈本身仅消耗很少的功率。超导回旋加速器是典型的紧结构加速器, 因为它们可以在高磁场下, 而且是在铁极的饱和水平以上运行。

(二) 同步回旋加速器

同步回旋加速器是同步加速器的先驱, 是扩展同步加速器的动能极限的早期尝试。同步回旋加速器也有一个几何形状类似于均匀场回旋加速器的恒定磁场。它与回旋加速器的主要不同是, 射频频率变化在相对论范围内保持粒子的同步。与回旋加速器比较, 同步回旋加速器是一种平均时间输出束流通量有很大降低的回旋加速器。这种加速器产生的质子动能已经达到 1GeV 。在亚吉电子伏范围内, AVF 回旋加速器代替了同步回旋加速器, 而且能得到一个连续束流。同步回旋加速器没有扩展到更高的能量范围, 是因为制造巨大的单个磁体, 在技术上和经济上有一定的困难。