

应用超导文集

严陆光 著

YINGYONG CHAODAO WENJI



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是严陆光院士关于超导应用方面的著作，全书共分10章，主要介绍超导材料、超导器件、超导磁体、超导电机、超导电缆、超导电子学、超导量子器件、超导量子信息、超导量子计算、超导量子通信等。本书可作为从事超导应用研究的科技人员、工程技术人员、管理人员、高等院校师生、研究生等的参考书。

YINGYONG CHAODAO WENJI

应用超导文集

严陆光 著

图书在版编目(CIP)数据

应用超导文集 / 严陆光著. — 北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-308-07208-7

I. ①应... II. 严... III. 超导技术—文集 IV. TN101-23

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第033741号

中国电力出版社出版
地址: 北京市三里河路6号 100044
电话: (010) 63910000
传真: (010) 63910001
网址: www.cepp.com.cn
责任编辑: 王静
封面设计: 王静
印刷: 北京印刷厂
发行: 中国电力出版社
地址: 北京市三里河路6号 100044
电话: (010) 63910000
传真: (010) 63910001
网址: www.cepp.com.cn
责任编辑: 王静
封面设计: 王静
印刷: 北京印刷厂
发行: 中国电力出版社



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本文集是严陆光院士与国内、国际合作者在应用超导研究领域 30 多年研究成果的汇总,是我国在这一领域开拓创新与国际合作的一部代表性文集,共收录中文科技文献 48 篇,英文科技文献 65 篇,其中一些文献是首次公开发表。内容涉及超导磁体技术及其在磁分离、磁拉单晶炉、磁流体发电、船舶推进、磁通泵、超导整流器和超导电机、高能加速器等方面的应用研究,对于从事应用超导技术科研、应用工作的研究者,超导、低温专业的学生以及关注我国应用超导发展历史和发展状况的各界人士具有较高的学习、参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

应用超导文集/严陆光著. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8503 - 7

I. 应… II. 严… III. 超导电技术 - 文集 IV. TN101 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 023481 号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

策 划: 周 娟 责任编辑: 齐 伟 高 军

责任印制: 陈焊彬 责任校对: 李 亚

北京盛通印刷股份有限公司印刷·各地新华书店经售

2009 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 47 印张 · 1174 千字 · 4 插页

定价: 98.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话 (010 - 88386685)

前言——我与应用超导

我于1959年由莫斯科动力学院电力系毕业,回国后一直在中国科学院电工研究所(以下简称电工所)从事科学研究与特种电工装备的研制工作。整个20世纪60年代,带领课题组进行了大能量电感储能电源的研发与建设工作,建成了合肥储能6000万J的七号电感储能装置。自20世纪70年代初起,我带领几个同志参加了中国科学院物理研究所陈春先同志领导的核聚变研究用的CT-6小型托卡马克的研制建设工作,搞了环形强磁场、脉冲变压器、电源与控制,1973年装置投入运行后,又到合肥筹建较大的CT-8托卡马克装置,1975~1976年还去意大利弗拉斯卡蒂核中心参加了强磁场(10T)、液氮冷却的FT托卡马克装置的调试工作,曾有幸在1979年花了两个月时间看了美国几乎全部核聚变研究的实验室,熟悉了核聚变电工,决心要为核聚变献身。

在以上两方面,近20年的工作中,如何获得强磁场都是一个重要问题,当时只能用常导体铜或铝,要消耗很大的功率与能量成为主要困难,采用超导是最诱人的出路。超导体的发现发生在1911年,荷兰的卡末林·昂内斯将金属汞冷却到液氮温度,突然发现电阻为零,展现了在电气工程中所有导线都可用超导体来无损耗地传输电流的美好前景。可惜的是,超导态要在一定的临界温度、临界磁场与临界电流以下才能存在,最初发现的超导体都由于临界磁场和临界电流密度太低而难于实用。经过物理界与材料界近半个世纪的持续努力,直至20世纪60年代初才发现了铌锆合金、铌钛合金与铌三锡化合物等能在液氮温度下承受强磁场与高电流密度的实用超导材料,开始了超导应用的新时代。我国从事超导与低温研究的物理学家管惟炎、洪朝生院士从20世纪60年代初开始就推动我们开展超导应用研究工作,我所创始人之一的韩朔先生20世纪60年代中期进行了调研论证,建议开展超导电工工作。电工所与物理所于1969年开始合作10万J超导储能装置的研制工作,1973年正式建立了电工所超导技术研究室,开创了我国电工领域的超导应用工作。

我实际参加应用超导工作由1973年CT-6托卡马克投入运行后开始,真正全身心投入是从文化大革命结束(1977年)至20世纪90年代初的十多年,直接负责一个课题组在一线从事研究实验工作,1979年~1984年任应用超导研究室副主任,1984年~1990年任研究室主任。1988年担任电工所所长后,仍主持一些超导磁体的研制与应用工作,关心推动应用超导事业继续前进,一线工作所花精力已明显减小,但仍坚持作出一些力所能及的贡献。

20 世纪 70 年代后期至 90 年代前期的 10 多年是我直接全身心从事科技工作的黄金时期。1978 年我有幸参加了全国科学大会，迎来了郭老宣称的“科学的春天”，整个国家形势与方针发生很大变化，宣布要走改革开放的道路，大力拨乱反正，科技得到很高的重视，条件有很大改善，提出要走向世界，赶超世界先进水平。根据总的方针，中国科学院又组织有关院士、专家对各所的方向、任务进行论证，章名涛、毛鹤年、高景德、丁舜年等院士都来所考察讨论，提出电工所应以“发展电工电能的应用基础理论及其新技术”为主要方向，对工作进行了调整，明确以磁流体发电、超导电工及微电子束加工三项电工新技术为重点，在赵志萱、杨昌琪所长领导下，全所都积极行动起来了。

我国电工界还刚刚开始应用超导工作，与世界先进水平有明显差距。在所里建设培养一支优良的科技队伍，逐渐赶上世界先进水平，在国内是应用超导方面的主力部队，在国际上能代表中国，成为我们的奋斗目标，要求我们集中全力地投入，可喜的是，经过大家近十年的团结努力，取得了良好的进展。主要的工作包括：

(1) 补充超导物理、超导材料与低温技术的有关知识，学习低温超导的实验技术，建立液氮低温站及实验室，为开展研究实验奠定基础。

(2) 超导磁体是低温超导应用的主要方面，在认真学习掌握国际成果基础上，进行有关应用基础研究，包括导线设计、磁体设计、磁体稳定性、失超传播、磁体保护、冷却方式、磁心以及检测技术的研究。

(3) 结合我国的实际需求，进行所需超导磁体的预先研究，模型磁体研制与试验，为实用磁体的研制打好基础。由于全室还有张永、林良真同志领导的两个组，三个组之间进行了合理分工，我们主要进行了充蜡稳定的超导螺管、磁流体发电用鞍形超导磁体及核聚变托卡马克用 D 型超导环形磁体的预先研究工作。

(4) 充分利用对外开放的大好形势，与德国、美国、法国、瑞士、日本等国的主要应用超导研究单位建立了紧密的交流合作关系，有计划地将骨干同志派往国际先进单位从事短期合作，持续参加主要国际会议，如磁体工艺会议、低温工程会议，进行学术交流，努力成为国际应用超导大家庭的重要成员。我自己也在 1983 ~ 1984 年应邀在西德卡尔斯卢厄核中心技术物理所参加 TESPE 环形超导磁体的实验研究与 LCT 大线圈试验工作，1987 年春应邀在日本高能物理所参加 Nb_3Sn 二极管磁体的实验研究。20 世纪 80 年代全室 56 位工作人员约有一半在国外工作过。

(5) 在改革开放以前，我们做科技工作，主要考核任务完成的好坏，不提倡发表论文，写文章被看成是名利思想的表现。走向世界后，国际交流主要靠文章，水平高低也常由文章来体现，有成果就要鼓励大家写成论文，到国际上发表，科技工作逐渐走上了正路。整个研究室每年的论文也进入了国际同行的前列。

通过上述多方面的工作与近十年的持续努力，所中确实成长起来了一支超导电工队

伍,是国内工作的主力部队,跟上了国际水平,成为国际的重要成员,这支队伍已具备了一定的研制实用超导磁体的能力。随着改革的深化,20世纪80年代中期,中国科学院的工作已不满足于仅做赶超世界先进水平的研究工作,提出要面向国民经济主战场,为国民经济发展做出贡献。邓小平同志的“发展高科技,实现产业化”的号召深入人心。我们将工作重心转向了接受各种超导磁体的实用任务,在完成实用磁体过程中继续提高技术。在20世纪80年代中期以后的十多年里,主要做了下列几方面的工作:

- (1) 磁流体发电用,室温孔径0.44m,磁长1.0m,中心磁场4T,储能8.65MJ的大型鞍形磁体系统。
- (2) 室温孔径0.5m,中心磁场3.5T的高岭土提纯用超导磁分离工业样机。
- (3) 300kW超导单极电机。
- (4) HEMS-1超导螺旋式电磁流体推进试验船。
- (5) 超导磁拉单晶、超导磁扫雷等的实用研究。
- (6) 无液氦超导磁体系统的研制与应用。

这些磁体系统的研制成功获得了中国科学院与部委科技进步奖五项,证实了我国超导磁体技术已成熟到可以实际应用,锻炼成长了相应的工程技术队伍,积累了应用的经验。1988年担任电工所所长后,我在一线直接从事科技工作的时间与精力显著减少,室验组的领导工作已由林良真、易昌练同志担任,但一直还在主持有关项目工作。

20世纪90年代中期以来,我们已大体具备了根据实际需求,设计、研制与提供实用超导磁体的能力,但由于长期以来人们没有可用的强磁场,还没有形成规模应用产品的市场需求,努力开拓强磁场的多方面应用,特别是规模产品的应用,成为推动实现产业化的关键。另一方面,20世纪80年代末发现了可在液氮温度下使用的高临界温度超导体,20世纪90年代中期已研制成实用的高临界温度超导线。这些导线可用于工频下保持超导,人们看到了超导工频电力应用的美好前景,开始了积极的超导电力的研发与示范工作。电工所的应用超导工作已先后由林良真、余运佳、肖立业、王秋良同志领导进行。虽然我已将主要精力转入推动全所其他电工新技术的发展,如磁流体发电与推进、磁浮列车、可再生能源发电、永久磁体等,但仍继续作为队伍的一员摇旗呐喊推动强磁场应用与超导电力前进。

应用超导包括强磁场应用与超导电力要真正成长为国民经济的支柱产业,还需要在超导材料的发展、磁体与电力技术的研发、提高经济性、开拓大规模产品的应用、发展相应产业方面做大量工作。我们这一代人大多数已经退休或接近退休,希望年青一代能更快更好地成长,挑起进一步发展与产业化的重担,真正实现21世纪上半叶电气工程进入超导电力与大规模强磁场应用的新时代。

承蒙肖立业、王秋良同志的大力支持,王晖等同志和研究生同学精心细致的工作,

中国电力出版社周娟、齐伟和高军同志的热心努力，得以在 2007 年出版了我的《磁浮交
通文集》后，将我多年来发表的应用超导近百篇论文与少量内部报告整理成这本《应用
超导文集》正式出版。希望它能为从事应用超导的科技工作者，以及电气工程的广大师
生研究参考，并能动员更多的年青同志下决心来积极推动我国应用超导事业的迅速发展。

本文集收录的论文是电工所一个大集体多年来团结奋斗的结果，这个集体先后包括：
林良真、张永、易昌练、马宏达、余运佳、张宏、刘德成、李会东、张丰元、叶祖湘、
韩燕生、荆伯弘、毕延芳、陈浩树、王式樑、王燕菊、赵惠娟、李光遂、秦洁、林企棠、
李忆平、李晓山、旷远达、王子凯、薛翠玲、高智远、陈月莲、孔庆文、宋守森、戴银
明、南和礼、沈伟俊、张永清、冯之鑫、雷沅忠、袁美艳、赵保志、罗昆仑、彭世万、
杨鸿盛、林桂英、高广箴、王秋良、温华明、杨鹏、戴少涛、方家荣、李新民、唐海涛、
李克文、肖立业等同志。所内及所外的陈敬林、蔡根鑫、屠规炳、葛文琪、唐绍栋、沙
次文、周适、彭燕、杨爱华、黄惠珠等同志也参加了有关项目的合作。

十分感谢我国知名专家韩朔、管惟炎、洪朝生、赵忠贤、甘子钊、尹道乐、王魁武、
周远、周廉、袁冠森、韩征和等的长期支持、指导与合作。十分感谢国际众多同行多方
面的帮助、交流与合作，特别应提到：德国的 Klose、Heinz、Komarek、Juengst、Kutch-
era、Wiik 先生，日本的 Hirabayashi、Shintomi、Kyotani、Tsuchiya、Onishi、Shimamoto、
Kiyoshi、Wada 先生，美国的王守田、Montgomery、Rosner、Schneider - Muntau、Iwasa、
Reardon、Stekly 先生，俄罗斯的 Zenkevitch、Veselovsky、Tovma、Chernoplekov、Keilin 先
生，意大利的 Sacchetti、Spadoni、Rossi、Negrini 先生，瑞士的 Brechna、Vechey、Morpur-
go 先生，法国的 Desportes、Kircher 先生等。十分感谢胡启恒、张厚英、赵志萱、杨昌琪、
韩朔、申世民等院所领导对我工作长期一贯的支持与鼓励。

严陆光

目 录

前言——我与应用超导

I 中文论文

- I -1 美国超导磁体研制工作的进展 (访美报告) 1
中国科学院电工研究所 1980 年 9 月
- I -2 感应法测定大电流超导线短样特性的实验研究 22
《低温物理》, 1980 年第 2 卷第 2 期 111 ~ 118 页
- I -3 超导磁体保护装置的研制经验 30
《低温物理》, 1981 年第 3 卷第 4 期 316 ~ 324 页
- I -4 充蜡稳定超导螺线管的实验研究 37
《低温物理》, 1981 年第 3 卷第 4 期 325 ~ 333 页
- I -5 铁心超导螺管的实验研究 46
《低温物理》, 1982 年第 4 卷第 1 期 56 ~ 64 页
- I -6 达到短样性能的拟无力超导环形磁体 54
《科学通报》, 1982 年第 27 卷第 15 期 910 ~ 914 页
- I -7 强磁场技术与超导应用 59
《电工电能新技术》, 1982 年第 1 卷第 2 期 49 ~ 56 页
- I -8 D_3 超导磁体的研制与试验 67
《低温物理》, 1983 年第 5 卷第 3 期 248 ~ 255 页
- I -9 充电速率对密绕超导磁体性能的影响 74
《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1983 年第 9 集 107 ~ 111 页
- I -10 密绕超导磁体失超动态过程的实验研究 77
《低温物理》, 1983 年第 5 卷第 4 期 343 ~ 353 页
- I -11 高电流密度鞍形超导磁体的研制 86
《低温与超导》, 1984 年第 12 卷第 2 期 64 ~ 69 页
- I -12 脉冲磁场对 NbTi 多丝复合超导体稳定性影响的实验研究 92
《低温物理》, 1984 年第 6 卷第 1 期 53 ~ 58 页
- I -13 内径 60cm 充蜡分层超导螺管的实验研究 97
《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1985 年第 10 集 36 ~ 41 页
- I -14 高电流密度的充蜡超导鞍形磁体 101
《电工电能新技术》, 1986 年第 5 卷第 1 期 35 ~ 41 页
- I -15 内径 30cm 充蜡超导螺管 107
《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1986 年第 11 集 71 ~ 80 页
- I -16 密绕分层超导磁体常导区传播的实验研究 115
《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1987 年第 13 集 39 ~ 50 页

I - 17	大鞍磁体内层超导线稳定性的实验研究	124
	《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1987 年第 14 集 55 ~ 66 页	
I - 18	捷克斯洛伐克的应用超导工作	134
	《低温与超导》, 1987 年第 15 卷第 4 期 57 ~ 61 页	
I - 19	300kW 单级电机 1 号超导磁体	139
	《低温与超导》, 1988 年第 16 卷第 2 期 57 ~ 62 页	
I - 20	高电流密度、涂漆导线浸泡冷却超导螺管磁体的研制	145
	《低温物理学报》, 1989 年第 11 卷第 2 期 117 ~ 123 页	
I - 21	在超导强磁体中低纯度钛心的研究	152
	《科学通报》, 1989 年第 34 卷第 10 期 741 ~ 743 页	
I - 22	高梯度磁分离样品试验装置用超导磁体	155
	《电工电能新技术》, 1989 年第 29 卷第 3 期 48 ~ 53 页	
I - 23	实验室用超导高梯度磁分离装置	161
	《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1989 年第 18 集 50 ~ 56 页	
I - 24	17T 钛心 NbTi-Nb ₃ Sn 超导磁体系统	166
	《低温与超导》, 1989 年第 17 卷第 1 期 58 ~ 67 页	
I - 25	在磁场中生长单晶技术与超导应用	174
	《电工电能新技术》, 1990 年第 9 卷第 1 期 44 ~ 51, 64 页	
I - 26	超导磁分离技术的应用	182
	《电工电能新技术》, 1990 年第 9 卷第 4 期 8 ~ 14 页	
I - 27	300kW 单极电机 2 号超导磁体的研制	188
	《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1991 年第 21 集 78 ~ 94 页	
I - 28	砷化镓单晶生长炉用超导磁体系统	200
	《电工电能新技术》, 1992 年第 11 卷第 2 期 42 ~ 47 页	
I - 29	20 世纪 80 年代超导应用的进展 (一)、(二)	205
	《电工电能新技术》, 1992 年第 11 卷第 3 期 1 ~ 10 页及第 4 期 9 ~ 15, 22 页	
I - 30	“磁窗”地面模拟实验超导磁体系统	221
	《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1992 年第 23 集 22 ~ 31 页	
I - 31	超导高岭土磁分离技术的工业应用	228
	《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1992 年第 24 集 152 ~ 161 页	
I - 32	全波超导整流磁通泵的理论探讨	237
	《电工电能新技术》, 1994 年第 13 卷第 1 期 37 ~ 43 页	
I - 33	用于磁通泵的快速超导开关	243
	《低温与超导》, 1994 年第 22 卷第 1 期 22 ~ 30 页	
I - 34	超导工频应用研究	250
	《低温与超导》, 1994 年第 22 卷第 1 期 53 ~ 58 页	
I - 35	快速反应的热控式超导开关研究	255
	《低温物理学报》, 1994 年第 16 卷第 3 期 239 ~ 244 页	
I - 36	磁流体发电用鞍形超导磁体的实验	261

	《低温物理学报》, 1994 年第 16 卷第 3 期 232 ~ 238 页	
I - 37	快充放电超导磁体的研制	267
	《电工电能新技术》, 1995 年第 14 卷第 1 期 45 ~ 50 页	
I - 38	全波超导整流器的研究	272
	《低温物理学报》, 1995 年第 17 卷第 2 期 154 ~ 159 页	
I - 39	船用旋转超导磁体杜瓦的设计与实验	277
	《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1995 年第 28 集 22 ~ 27 页	
I - 40	设计和测试用于超导“磁窗”的全波超导整流磁通泵	282
	《低温与超导》, 1996 年第 24 卷第 4 期 31 ~ 39 页	
I - 41	超导磁扫雷装置工程模拟超导磁体的研制	290
	《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1997 年第 30 集 51 ~ 62 页	
I - 42	磁流体发电用鞍形超导磁体卧式低温容器的研制与实验	301
	《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1997 年第 30 集 78 ~ 85 页	
I - 43	大鞍超导磁体系统的实验	309
	《中国科学院电工研究所论文报告集》, 1997 年第 30 集 67 ~ 73 页	
I - 44	磁流体船舶推进用超导磁体系统的研制	315
	《电工电能新技术》, 1999 年第 18 卷第 3 期 59 ~ 63 页	
I - 45	超导混合磁力轴承的发展现状和前景	320
	《电工电能新技术》, 2000 年第 19 卷第 1 期 27 ~ 31 页	
I - 46	超导在加速器中的应用概况	325
	《低温与超导》, 2005 年第 33 卷第 1 期 46 ~ 49, 39 页	
I - 47	6T NbTi 传导冷却超导磁体系统杜瓦容器的研制	331
	《低温物理学报》, 2005 年第 27 卷第 2 期 179 ~ 184 页	
I - 48	高临界温度超导应用的进展与展望	336
	《电工电能新技术》, 2006 年第 25 卷第 1 期 1 ~ 4, 34 页	
II	英文论文	
II - 1	Experimental Investigation on Wax-Filled Superconducting Solenoids	342
	(“IEEE Transactions on Magnetics”, Vol. 17, No. 5, Sep. 1981, 1638 - 1641)	
II - 2	Experimental Investigation of an Iron-Core Superconducting Solenoid	349
	(“IEEE Transactions on Magnetics”, Vol. 17, No. 5, Sep. 1981, 2028 - 2031)	
II - 3	Experimental Investigation of a 60cm Bore Wax-Filled Superconducting Solenoid With Different Winding Current Density	355
	(“Proceedings of the International Cryogenic Engineering Conference”, 142 - 145, 1982)	
II - 4	Experimental Investigation of the Quench Dynamic Process of the Close-Packed Super- conducting Magnets	359
	(“Proceedings of the International Cryogenic Engineering Conference”, 819 - 822, 1982)	
II - 5	Development and Test of a High Current Density Superconducting Saddle Magnet	

SSM - 3	363
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 19, No. 3, 1381 - 1384, May 1983)	
II - 6 A Superconducting Toroidal Magnet With Quasi-Force-Free Configuration	369
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 19, No. 3, 324 - 327, May 1983)	
II - 7 Experiences in Developing The High Current Density Wax-Filled Superconducting Saddle Magnets	375
("Journal de Physique (Paris), Colloque, Cl", Vol. 45, Supplement No. 1, 837 - 840, Jan. 1984)	
II - 8 Improvement on The Support Structure of The Superconducting Saddle Magnet SSM - 3	380
("Journal de Physique (Paris), Colloque, Cl", Vol. 45, Supplement No. 1, 841 - 844, Jan. 1984)	
II - 9 Experimental Study of The Stability of NbTi Composite Conductor Under The Influence of Pulsed Magnetic Field	384
("Journal de Physique (Paris), Colloque, Cl", Vol. 45, Supplement No. 1, 495 - 498, Jan. 1984)	
II - 10 Stability of The Tespe Superconducting Torus Magnets	388
("IEEE Transactions on Magnetics" Vol. 21, No. 2, 253 - 256, Mar. 1985)	
II - 11 Magnetic Field Measurement Within Superconducting Windings by CLTS Temperature Sensors	393
("Cryogenics", Vol. 25, No. 1, 23 - 26, Jan. 1985)	
II - 12 A 30cm Bore Wax-Filled Superconducting Solenoid: Design, Construction and Test Results	398
("Proceedings of the 9 th International Conference on Magnet Technology (MT-9)", 398 - 401, 1985)	
II - 13 Superconducting Torus "TESPE" at Design Values	404
("Proceedings of the 9 th International Conference on Magnet Technology (MT-9)", 36 - 39, 1985)	
II - 14 Experimental Investigation with TESPE 3 - Coil Toroidal Magnet System	410
("KEK Internal Report", 86 - 24, Mar. 1987)	
II - 15 Applied Superconductivity Work at the Institute of Electrical Engineering, Academia Sinica	425
("Cryogenics", Vol. 27, No. 9, 484 - 494, Sep. 1987)	
II - 16 Some Results from the First Test of A Double-Shell Nb ₃ Sn Dipole	440
("KEK Internal Report", 87 - 14, Sept. 1987)	
II - 17 A High Current Density Bath-Cooled Superconducting Solenoid with Varnish-Coated Conductor	455
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 24, No. 2, 1078 - 1081, Mar. 1988)	
II - 18 Experimental Investigation on Normal Zone Propagation in A Close-packed Supercon-	

ducting Solenoid	461
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 24, No. 2, 1201 - 1204, Mar. 1988)	
II - 19 Stability Test of the Superconductor, for Large Saddle Magnet for MHD Experimental Generator No. 1	467
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 24, NO. 2, 1205 - 1208, Mar. 1988)	
II - 20 Superconducting Magnet No. 1 for 300kW Homopolar Generator	472
("Proceedings of the 20 th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20)", 763 - 767, July 1988)	
II - 21 Study on Low-purity Holmium Core for High-field Superconducting Solenoid	476
("Proceedings of the 20 th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20)", 869 - 873, July 1988)	
II - 22 A Laboratory Superconducting High Gradient Magnetic Separator	480
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 25, No. 2, 1873 - 1876, Mar. 1989)	
II - 23 A 17T NbTi - Nb ₃ Sn Superconducting Magnet with Low-purity Holmium Core	485
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 25, No. 2, 1676 - 1679, Mar. 1989)	
II - 24 A High Current Density Superconducting Solenoid with Joints Within the Winding	489
("Proceedings of the 11th International Conference on Magnet Technology (MT - 11)", Vol. 2, 1306 - 1311, Oct. 1989)	
II - 25 Development of Superconducting High Gradient Magnetic Separator for Beneficiation of Kaolin Clay	494
("Proceedings of the Second world Congress on Nonmetallic Minerals", 937 - 940, Oct. 1989)	
II - 26 Progress of the MHD Superconducting Magnet Development in China	498
("Proceedings of 10 th International Conference on Magnethydrodynamic Electrical Power Generation", Vol. 1, VI. 1 - VI. 8, Dec. 1989)	
II - 27 Study on Low-Purity Holmium Core for High-Field Superconducting Solenoid	507
("Chinese Science Bulletin", Vol. 34, No. 23, 1946 - 1950, Dec. 1989)	
II - 28 Experimental Study on Chinese High-Sulfur Coal Cleaning by Superconducting High Gradient Magnetic Separation	510
("Proceedings of the Low Temperature Engineering and Cryogenics Conference", p 03. 3, Jul. 1990)	
II - 29 Design and Development of A Superconducting Magnet for Industrial Magnetic Separator	515
("Cryogenics", Vol. 30, September supplement, 771 - 775, Sept. 1990)	
II - 30 Feasibility Study on Kaolin Clay Purification and Coal Desulfurization by Supercon-	

ducting HGMS	519
("Cryogenics", Vol. 30, September supplement, 767 – 770, Sept. 1990)	
II – 31 Experimental Measurement and Analysis of Normal Zone Propagation with A Close-Packed Superconducting Model	523
("Cryogenics", Vol. 30, September supplement, 659 – 663, Sept. 1990)	
II – 32 The Ferromagnetic Shielding Used for Superconducting Magnetic Separator ...	528
("Cryogenics", Vol. 30, September supplement, 776 – 780, Sept. 1990)	
II – 33 Development of the Superconducting Magnet System for Industrial High Gradient Magnetic Separator	532
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 27, No. 2, pt III, 2276 – 2279, Mar. 1991)	
II – 34 Stability of High Current Density Magnets with Narrow Liquid Helium Channel Cooling	537
("Cryogenics", Vol. 31, No. 7, 580 – 584, July 1991)	
II – 35 Construction of A Large Saddle Superconducting Magnet for MHD Power Generation	543
("Proceedings of the 11th International Conference on MHD Electrical Power Generation", Vol. 2, 494 – 497, Oct. 1992)	
II – 36 Recent Progress of the Superconducting Magnet for MHD in China	547
("Fusion Engineering and Design", Vol. 20, 299 – 303, Jan. 1993)	
II – 37 The Test of A Superconducting Saddle Magnet for MHD Facility	552
("Cryogenics", Vol. 34, supplement, 709 – 712, 1994)	
II – 38 Laboratory Test of An Industrial Superconducting Magnetic Separator for Kaolin Clay Purification	556
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 30, No. 4, pt 2, 2499 – 2502, July 1994)	
II – 39 A Saddle Superconducting Magnet for Experimental MHD Generator	562
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 30, No. 4, pt 2, 2495 – 2498, July 1994)	
II – 40 Recent Progress of Applied Superconductivity in China	566
("Cryogenics", Vol. 35, No. 12, 843 – 851, Dec. 1995)	
II – 41 Development and Test of A 300kW Superconducting Homopolar Generator	578
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 32, No. 4, pt1, 2280 – 2283, July 1996)	
II – 42 Study of Full-wave Superconducting Rectifier-type Flux-pumps	584
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 32, No. 4, pt1, 2699 – 2702, July 1996)	
II – 43 A Fast-Ramp Superconducting Magnet for HGMS	590
("IEEE Transactions on Magnetics", Vol. 32, No. 4, pt1, 2707 – 2709, July	

	1996)	
II - 44	Development and Application of the Magnet Technology in China	594
	("Proceedings of 15th International Conference on Magnet Technology (MT - 15)",	
	30 - 35, Oct. 1997)	
II - 45	Preliminary Conceptual Design of A Superconducting Dipole Bending Magnet for	
	Shanghai Synchrotron Radiation Facility	602
	("Proceedings of 15th International Conference on Magnet Technology (MT -	
	15)", 320 - 322, Oct. 1997)	
II - 46	Investigation on Application of Superconducting High Gradient Magnetic Separation	
	Technology to Ultra-fine Kaolin Clay	606
	("Proceedings of 15th International Conference on Magnet Technology (MT - 15)",	
	759 - 762, Oct. 1997)	
II - 47	The Test of Saddle Superconducting Magnet System	611
	("Proceedings of 15th International Conference on Magnet Technology (MT - 15)",	
	843 - 846, Oct. 1997)	
II - 48	R & D of Superconducting Flux Pump for Superconducting Magnet	615
	("Proceedings of 15th International Conference on Magnet Technology (MT - 15)",	
	923 - 926, Oct. 1997)	
II - 49	A Superconducting Magnet System for MHD Propulsion Research	619
	("IEEE Transactions on Applied Superconductivity", Vol. 7, No. 2, 509 - 512,	
	June 1997)	
II - 50	Progress of the MHD Ship Propulsion Project in China	624
	("IEEE Transactions on Applied Superconductivity", Vol. 10, No. 1, 951 - 954,	
	2000)	
II - 51	Development of the Superconducting Magnet System for HEMS-1 MHD Model	
	Ship	630
	("IEEE Transactions on Applied Superconductivity", Vol. 10, No. 1, 955 - 958,	
	2000)	
II - 52	Elementary Study on Superconducting Electromagnetic Ships with Helical Insulation	
	Wall	636
	("Cryogenics", Vol. 40, No. 6, 353 - 359, 2000)	
II - 53	A New Flywheel Energy Storage System Using Hybrid Superconducting Magnetic	
	Bearings	645
	("IEEE Transactions on Applied Superconductivity", Vol. 11, No. 1 II, 1657 -	
	1660, March 2001)	
II - 54	Development of Wide-Bore Conduction-Cooled Superconducting Magnet System for	
	Material Processing Applications	651
	("IEEE Transactions on Applied Superconductivity", Vol. 14, No. 2, 372 - 375,	
	June 2004)	

II - 55	Study on a Hybrid Superconducting Magnetic Bearing System	658
	("Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC 20)", 657 - 660, 2005)	
II - 56	Design Study of Conduction-Cooled High Temperature Superconducting Magnet	663
	("Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC 20)", 621 - 624, 2005)	
II - 57	Tests on a 6T Conduction-Cooled Superconducting Magnet	668
	("IEEE Transactions on Applied Superconductivity", Vol. 16, No. 2, 961 - 964, June 2006)	
II - 58	Development of GM Cryocooler-Cooled Bi2223 High Temperature Superconducting Magnetic Separator	674
	("IEEE Transactions on Applied Superconductivity", Vol. 17, No. 2, 2185 - 2188, June 2007)	
II - 59	Design and Test of Conduction-Cooled High Homogenous Magnetic Field Superconducting Magnet for Gyrotron	679
	("IEEE Transactions on Applied Superconductivity", Vol. 17, No. 2, 2319 - 2322, June 2007)	
II - 60	Development of High Magnetic Field Superconducting Magnet Technology and Applications in China	686
	("Cryogenics", Vol. 47, No. 7 - 8 SPEC. ISS. , 364 - 379, July/August, 2007)	
II - 61	A 30kJ Bi2223 High Temperature Superconducting Magnet for SMES with Solid-Nitrogen Protection	706
	(IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, 754 - 757, June 2008)	
II - 62	Design of Superconducting Magnet for Background Magnetic Field	714
	(IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, 548 - 551, July 2008)	
II - 63	Development of Large-bore Superconducting Magnet with Zero-vapor Liquid Helium	721
	(IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, June 2008, 787 - 790)	
II - 64	Development of Strain Measurement in Superconducting Magnet through Fiber Bragg Grating	728
	(IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, 1419 - 1423, June 2008)	
II - 65	Study on Dipole Moment in Permanent Magnet Used in Space Anti-Matter Detector	733
	(IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, 972 - 975, June 2008)	

美国超导磁体研制工作的进展 (访美报告)

严陆光

中国科学院电工研究所

1980年9月

一、前言

应美国马里兰大学刘全生教授的邀请,我与物理所陈春先同志及中国科技大学项志遵同志一起于1979年11月1日~12月22日访问了美国一些主要的核聚变研究单位。借此机会,顺访了一些美国超导磁体的研制单位与厂家。在此期间,我参加了美国第八次聚变工程会议(11月13日~16日于旧金山召开),参观了普林斯顿等离子体物理实验室(PPPL)、费米国立加速器实验室(FNAL)、麻省理工学院国立强磁场实验室(FBNML)、洛伦兹利勿莫尔实验室(LLI)、洛伦兹伯克来实验室(LBL)、通用原子公司(GA),以及MCA、AIRCO、SUPERCON三个超导线与中小型磁体生产厂家和生产液氦机的CTI公司。

在参观、访问与工程会议上,遇到了大多数美国在超导线与超导磁体方面的知名专家,如S. Ackerman、E. Adam、R. W. Boom、D. N. Cornish、J. File、T. H. K. Franderking、B. Gilbert、E. Gregory、P. N. Haubenreich、Y. Iwasa、M. Kurchi、M. S. Lubell、P. G. Marston、D. B. Montgomery、J. Purcell、J. D. Rogers、C. H. Rosner、J. L. Smith Jr、Z. J. J. Stekly、S. T. Wang(王守田)、J. E. C. Williams、T. A. DeWinger、J. Wang等。有机会与其中大多数进行了较详细地交谈,了解他们的工作和观点。

本文主要描述访美期间的所闻、所见和个人的观感。为了叙述的准确、完整,也引用了部分文献资料。

二、聚变用超导磁体^[1]

(一) 受控热核反应的研究是当代重大的研究课题之一,它的解决将为人类提供实际上用之不竭的能源。经过30余年的持续努力,当前正处于突破证实科学可行性(点火)的前夕,并积极为证实工程可行性(建造实验功率堆)开展着多方面的预制研究工作。受控热核反应的研究沿着多途径发展,主要途径分成惯性约束(激光、电子束、离子束打靶)和磁约束(托卡马克、仿星器、磁镜、漂浮环、表面磁约束、反场收缩、球马克等)两大类。所有磁约束聚变研究均需有特定要求的磁场,采用超导磁场在一些实验装置中已显示了重大的优越性,而立足于建造聚变反应堆超导磁场则成为必不可少的重要部件。美国是世界核聚变研究的主要国家之一,目前用于磁聚变研究的年经费约4亿美元,而超导磁体的研制是磁聚变工艺发展的重要组成部分,年经费为1200~1500万美元。表1中列出了美国聚变超导磁体研制概况。

(二) 磁镜是历史最久的磁约束途径之一,它利用按最小B原理设计的恒定磁场来约束注入的高温等离子体。在近30年的发展过程中,约束磁场形态经历了由一对螺管组成的简单磁瓶、加上约飞棒四极场后的组合磁笼,全球缝磁体、阴阳线圈至串列磁镜的发展。使等离子体约束性能得到了很大的改善,达到了 $n\tau=10^{11}s$ 的水平。由于磁镜装置需

要的是长时间稳定运行的直流磁场,这方面超导磁体技术上最成熟,优越性最显著,20世纪70年代初美国建成了三个超导磁镜装置,取得了研制与运行经验,在几个国家实验室建立了研制队伍。1976年洛伦兹利勿莫尔实验室(LLL)开始了建造大型磁镜装置MFTF计划,表2中列出了它的阴阳线圈磁体系统的主要参数^[1,6]。这个大型、全稳定超导磁体按其能量虽与大型氢泡室磁体大体相同,但其磁体形状的复杂性、高达7.7T的最强场、磁体重量等却标志着磁体技术提高到了一个新的水平。1979年冬我们参观实验室时一个磁体已绕好,第二个磁体正在绕制,预期在1980年秋完成磁体的制造与调试。

表1 美国聚变超导磁体概况

	托卡马克	磁 镜	漂 浮 环
已有成就		(1) 1971年ORNL建成IMP装置, $B_m = 8.5\text{T}$, 2.4MJ (2) 1971年LLL建成Baseball II装置, 5.5T, 8.9MJ (3) NASA Lewis Lab建成 $\phi 0.51\text{m}$ 磁镜, 10T, 8.5MJ	(1) 1971年PPPL建成FM-1装置, $2R = 1.52\text{m}$, $2a = 0.18\text{m}$, 425kA, Nb_3Sn (2) 1971年LLL建成Levitron装置, $2R = 0.8\text{m}$, $2a = 0.09\text{m}$, 300kA, Nb_3Sn
当前计划	(1) 环形磁体系统——大线圈计划(LCP)。孔径 $2.5\text{m} \times 3.5\text{m}$, D形, 6个线圈, 8T, 800MJ, 6千万美金, 1976~1984年 (2) 12T强磁场计划。4个被试线圈, $\phi_{\text{内}} = 0.4\text{m}$, 1978~1984年 (3) 20MJ脉冲极向场系统。50kA, $\pm 7\text{T}/1\text{s}$, 1983年完成	(1) LLL建造MFTF装置。7.7T, 409MJ, $3.3 \times 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}$, 1981年建成 (2) 正在论证MFTF-B装置方案, 3000MJ, 11T, 45m, 1985年建成	UCLA提出磁城(Supernac)方案, 正待批准。第一阶段(SLQ)需: 内环 $\phi 1.76\text{m}$, 1MA; 外环 $\phi 3.52\text{m}$, 0.754MA, $W_M \approx 5\text{MJ}$
前景	20世纪80年代末建成ETF或Intor。4m $\times$ 9m, 10~12T, 10^{10}J 环形场	20世纪80年代末建成磁镜实验堆	

表2 MFTF装置概况

阴阳线圈示意图		
主要尺寸	大半径2.5m; 小半径0.75m; 大圆中心距1.4m; 镜距3.6m; 绕组截面0.9m $\times$ 0.36m	
磁体参数	$B_0 = 2\text{T}$, $B_{\text{max}} = 7.68\text{T}$; 镜比: 2:1, $I = 5775\text{A}$; $N = 58\text{层} \times 24 = 1392\text{匝/线圈}$; $NI = 8.04\text{MA/线圈}$, $IL_{\Sigma} = 3.3 \times 10^8 \text{ Am}$; $J_{\text{导线}} = 3730\text{A/cm}^2$, $J_{\Sigma} = 2525\text{A/cm}^2$; $G_{\text{导线}} = 54.4\text{t}$, $G_{\Sigma} = 300\text{t}$; $W_M = 409\text{MJ}$	

图1 阴阳线圈示意图