

电工高新技术丛书

中国电工技术学会
编

- 聚变电工技术
- 超导技术及其应用
- 储能技术的新发展

第3分册



机械工业出版社
China Machine Press

电工高新技术丛书

第3分册

- 聚变电工技术
 - 超导技术及其应用
 - 储能技术的新发展
- 中国电工技术学会 编



机械工业出版社

电工高新技术丛书共六个分册,本书为第3分册。本分册共有三个专题,其技术内容包括聚变电工技术、超导技术及其应用、储能技术的新发展。

随着高新技术对传统电工技术的渗透,电工技术的更新和创新日新月异,读者可从这套丛书中开拓视野、增长才智、启迪借鉴,并从中汲取营养,以促进事业的发展 and 再创造。

本丛书的内容新颖、文字深入浅出,适于中级以上的工程技术人员、国家公务员、企事业单位技术管理人员及工科院校的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电工高新技术丛书/中国电工技术学会编. —北京:机械工业出版社, 2000.3

ISBN 7-111-07898-5

I. 电… II. 中… III. 电工技术:高技术-丛书
IV. TM-51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 03631 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:周娟 版式设计:冉晓华 责任校对:姚培新

封面设计:姚毅 责任印制:何全君

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 1 月第 1 版·第 2 次印刷

787mm×1092mm¹/₃₂·6 印张·128 千字

2 001—3 500 册

定价:12.00 元 (全套 6 册,共 108.00 元)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

《电工高新技术丛书》编辑委员会名单

主 任：赵明生

常务副主任：张林昌

副 主 任：赖 坚 严陆光 姚福生 石定寰

周鹤良 冯冠平 陈瑞藻

委 员：汪 耕 梁维燕 万遇良 吴维韩

王赞基 林良真 陈伯时 吴济钧

罗命钧 李方训 胡必权

主 编：张林昌

副 主 编：万遇良 吴维韩 李方训 满慧文

编辑部主任：王玉洁

编辑部副主任：王琳

前 言

人类历史的发展证明，科学精神、科学思想和科学方法在物质文明和精神文明建设中发挥着先导和支柱的作用。中国电工技术学会受科学技术部高新技术发展及产业化司委托，组织编写《电工高新技术丛书》，以下简称《丛书》。我会一贯具有面向人民群众宣传普及科学知识的光荣传统，最近几年来，我们以《中共中央、国务院关于加强科学普及工作的若干意见》为指导思想，经过各方面专家、教授的努力，着手编辑出版《电工高新技术丛书》（以下简称《丛书》），面向各级领导干部、技术人员普及科学知识，弘扬科学精神，提倡科学态度，传播科学思想。

本套《丛书》分为六个分册，内容包括新能源发电技术、超导技术、智能控制技术、电气设备状态监测技术、电力电子技术、电动车技术等。每个分册约 25 万字，由若干个相近专题组成，内容新颖，通俗易懂，文字精炼，引人入胜。《丛书》的定位为高科技科普读物，包括新理论、新产品、新方法、新技术、新工艺、新材料，主要涉及国际上技术已经成熟，且国内尚未完全掌握或属于世界电工技术的前沿课题，这样，保证了《丛书》普及高新技术的特点。

《丛书》的出版，对宣传电工技术最新发展动态，对加强技术创新，发展高科技，推动生产力跨越式发展，具有十分重要的现实意义和深远影响。《丛书》的出版，为国家公务员、科技人员提供一个了解当今世界先进电工技术的窗

口,使读者开拓视野、增长才智,起到启迪借鉴、触类旁通的作用。

《丛书》的出版,在列选题、写作及编辑过程中得到了清华大学、北京邮电大学、北方交通大学、中国科学院电工研究所、天津电源研究所和文章作者的支持,在《丛书》出版之际,谨向支持的部门、单位和作者致以深切的谢意。

由于时间所限,还有其他一些电工高新技术没有编入本丛书,编写中也难免会出现某些差错,欢迎读者给予批评指正。

中国电工技术学会

2000年3月

目 录

前言

I 聚变电工技术

第 1 章	概论	3
第 2 章	核聚变能	5
第 3 章	受控核聚变的途径	11
第 4 章	托卡马克的进展	20
第 5 章	激光聚变的进展	29
第 6 章	聚变反应堆与发电	36
第 7 章	大体积强磁场技术	42
第 8 章	强脉冲电源技术	53
第 9 章	辅助加热技术	65
第 10 章	展望	70
参考文献		71

II 超导技术及其应用

第 1 章	超导电性的发现	75
第 2 章	超导体的特性	78
2.1	零电阻现象	78
2.2	迈斯纳 (Meissner) 效应	79
2.3	比热容	80
2.4	超导体的临界特性	81

2.4.1	临界温度	81
2.4.2	临界磁场	82
2.4.3	临界电流密度	82
第 3 章	实用超导材料	84
3.1	传统的低温超导材料	84
3.1.1	对实用超导材料的要求	84
3.1.2	超导线材的制造方法	85
3.1.3	实用超导线的特性	86
3.2	高温超导材料	88
3.2.1	高温超导材料的发现	88
3.2.2	高温超导体的超导特性	89
3.2.3	高温超导材料的实用化	92
第 4 章	超导磁体及其稳定性	95
4.1	概述	95
4.2	超导体和超导磁体的稳定化	96
4.2.1	超导磁体的失超	96
4.2.2	磁通跳跃	97
4.2.3	动态稳定	98
4.2.4	低温稳定	99
4.2.5	超导磁体的失超保护	100
第 5 章	超导技术的应用	102
5.1	超导技术在电力领域中的应用	102
5.1.1	超导储能	102
5.1.2	超导变压器	104
5.1.3	超导输电电缆	105
5.1.4	超导故障电流限制器	107

5.1.5 超导电机	108
5.2 超导磁体在大型科学与工程中的应用	109
5.2.1 高能加速器用超导磁体	110
5.2.2 探测器用超导磁体	111
5.2.3 核聚变实验装置中的超导磁体	112
5.3 超导磁体在交通、工业和生物医学领域中的应用	114
5.3.1 超导磁悬浮列车	114
5.3.2 超导磁分离机	115
5.3.3 超导磁粒单晶生长炉	116
5.3.4 超导核磁成像装置和超导核磁共振谱仪	117
参考文献	119

III 储能技术的新发展

第1章 序论	123
1.1 美丽的地球，干净的能源	123
1.2 能量的储存	124
1.2.1 能量储存的必要性	124
1.2.2 能量形态与相应的储能技术	125
1.3 电能储存形态与相应技术	126
1.3.1 电力储存的必要性	126
1.3.2 电力储存技术的分类	130
1.3.3 现有的电力储存技术 ——抽水蓄能发电	131
1.3.4 研究开发中的电力储存技术	132
第2章 飞轮电力储能	135
2.1 久远古老的概念，现代尖端的技术	135
2.2 飞轮电力储能系统技术概述	135

2.2.1 基本原理	135
2.2.2 系统构成	136
2.2.3 系统规模	137
2.2.4 运行模式	138
2.3 飞轮储能技术的特点	139
2.4 飞轮本体	141
2.5 轴承	144
2.6 高效电能转换	146
2.7 飞轮电力储能的应用	147
2.7.1 电网调峰谷用储能系统	147
2.7.2 电力系统稳定装置	147
2.7.3 新能源的储能系统	148
2.7.4 不间断电源用飞轮	148
2.7.5 人造卫星用飞轮系统	149
2.7.6 电动汽车用飞轮电池	149
2.8 飞轮储能技术的现状	149
2.9 飞轮储能技术的评价与展望	150
第3章 超导储能技术	151
3.1 引言	151
3.2 超导储能的基本原理	152
3.3 超导储能与其他储能方式的比较	153
3.4 超导储能的可能应用范围	154
3.5 超导储能的研究与开发进展	156
3.6 微型和小型超导储能装置	160
3.6.1 30MJ 超导储能系统在电网中的运行	160
3.6.2 微型和小型超导储能产品装置	162
3.7 中型和大型超导储能装置	171
3.7.1 超导储能工程实验模型计划	171

3.7.2 美国阿拉斯加电网用超导储能装置	171
3.7.3 日本 480MJ 的环型超导储能装置	172
3.8 超导储能技术的关键问题	172
3.8.1 超导磁体系统	172
3.8.2 超导储能系统中的功率调节装置	178
3.8.3 快速测量控制、数据采集和处理系统	178
3.9 结束语	178
参考文献	180

I 聚变电工技术

中国科学院电工研究所 严陆光

第 1 章 概 论

21 世纪人类将进入经济与社会持续协调发展的新时代，能源可持续发展占有特殊重要的地位。我们所面临的问题是，能源的需求将继续增长，而作为主要商品能源的化石能源（石油、煤、天然气）的资源已开始枯竭，比较乐观的估计也只能再支撑二三百年的；水力资源的开发与利用将达到相当高的程度，所余潜力不大；核裂变能也将受到可用资源的限制。能源可持续发展最终将依赖于基于太阳能的可再生能源（包括太阳辐照能、风能、生物能、海洋能等）和核聚变能的开发利用。

可喜的是经过近半个世纪的持续努力，人类在受控核聚变的研究方面取得了重大进展，可以期望再经过半个世纪的努力，实现第一个核聚变电站，开始受控核聚变的开发利用。从 21 世纪下半叶起，核聚变能在人类总能源中的份额必将逐步增长，成为人类持续发展可依赖的主要能源。

如果说核裂变能的开发利用主要依赖于核裂变工程技术与热工技术的结合与发展，在核聚变研究与聚变能的开发利用中，电工技术的发展起着特别重要的作用，需要我们这些电气工程工作者做出更大的努力。

鉴于目前广大电气工程工作者对核聚变的研究发展还不熟悉，本文首先介绍了一些有关核聚变的基本情况，简要叙述人类多途径探索实现受控核聚变的努力，目前已形成的托卡马克磁约束聚变和激光打靶惯性约束聚变两条主要途径的

进展情况，然后再介绍与聚变研究与发展有关的大体积、强磁场技术，强脉冲电源技术，辅助加热技术，以及聚变反应堆与发电等电工新技术的进展，期望能增进电工界同仁对这一重大领域的了解，动员大家更加关心它的前进，为受控核聚变的实现与聚变能的开发利用做出我们电气工程工作者应有的贡献。

第2章 核聚变能

核聚变能是轻原子核聚变时释放出来的物质结合能。若仅考虑五种最轻元素（氢、氦、锂、铍、硼）的同位素，表2-1列出了一些主要的聚变反应，表中n为中子、p为质子，D、T分别为氢的同位素氘、氚，所生成核素后的括号内示出了该核素所带的能量（MeV）。

表 1.2-1 轻核的聚变反应

No	聚 变 反 应	总释能/MeV
1	$D + D \longrightarrow {}^3\text{He} (0.82) + n (2.45)$	3.27
2	$D + D \longrightarrow T (1.01) + p (3.03)$	4.04
3	$D + T \longrightarrow {}^4\text{He} (3.52) + n (14.08)$	17.6
4	$D + {}^3\text{He} \longrightarrow {}^4\text{He} (3.67) + p (14.67)$	18.4
5	$p + {}^{11}\text{B} \longrightarrow 3{}^4\text{He} (2.89)$	8.67
6	$p + {}^6\text{Li} \longrightarrow {}^3\text{He} (2.30) + {}^4\text{He} (1.72)$	4.02
7	${}^3\text{He} + {}^6\text{Li} \longrightarrow p (12.40) + 2{}^4\text{He} (2.25)$	16.9
8	$p + {}^9\text{Be} \longrightarrow {}^4\text{He} (1.38) + {}^6\text{Li} (0.85)$	2.13
9	$n + {}^6\text{Li} \longrightarrow {}^4\text{He} + T$	4.8
10	$n + {}^7\text{Li} \longrightarrow 4\text{He} + T + n$	-2.87

从能源角度看，最容易实现的是氘氚反应（表1.2-1中反应3），此时一个氘原子与一个氚原子结合反应将释放出17.6MeV的能量。考虑到 $1\text{MeV} = 1.602 \times 10^{-13}\text{J}$ 和1g氘含有 3.01×10^{23} 个原子，则每克氘与1.5克氚反应将能释

放出 $8.5 \times 10^{11} \text{J}$ 能量，相当于 29t 标准煤的能量。氘可由重水分解获得，在地面上，氘原子与氢原子的比例为 1/6700，全球海洋总面积为 $3.61 \times 10^{14} \text{m}^2$ ，平均深度为 3795m，则海水总量约为 $1.37 \times 10^{18} \text{t}$ ，其中含氢 $1.52 \times 10^{17} \text{t}$ ，从而海洋中氘的总含量达 $4.6 \times 10^{13} \text{t}$ ，它与氘反应所能放出的能量为 $3.9 \times 10^{31} \text{J}$ ，相当于 $1.3 \times 10^{21} \text{t}$ 标准煤，与全世界预测的煤总储量为数十万亿吨相比，要大 10^7 倍。与石油相比，1L 海水中的氘 (32mg) 能放出的能量相当于 300L 汽油。这些数字雄辩地说明，核聚变能是实际上用之不竭的能源，是人类未来能源的主要依靠。

氚是一种半衰期为 12.26 年的放射性氢同位素，需要人工制造，最方便的方法是在反应堆锂壳层中进行增殖产生 (表 1.2-1 中，反应 9 和 10)，从而氘-氚聚变反应的初始燃料元素是氘和锂。在天然锂中含有 7.4% 的锂 6 和 92.6% 的锂 7 同位素，中子与锂 6 产生氚的反应是放热的，与锂 7 的反应是吸热的。这样，氘氚反应产生的 14MeV 中子进入到含天然锂的壳层中，以较高的概率与锂 7 反应，从而产生的较小能量的二次中子再与锂 6 反应，这将能产生约 1.9 个氚原子和 $(14 + 4.8 - 2.87) \text{MeV} = 16 \text{MeV}$ 的总能量。目前，锂可由卫晶岩石、盐湖咸水、地热水、矿泉水及油田水中提取，年产近万吨，已探明的资源全球约为 140 万 t，预期资源合计约为 1100 万 t。海洋中锂资源丰富得多，估计每升海水中含 0.1~0.19mg，若取平均 0.145mg，则总储量达 $2 \times 10^{11} \text{t}$ 。从锂资源看，聚变能也是用之不竭的。

实际要得到聚变能是一个十分困难与复杂的任务。这是因为，首先，必须使带正电的原子核充分靠近，才能使核力发生作用，产生反应。这就要克服带电核之间巨大的库仑斥