

大电流能量 技术与应用

(日) 电气学会大电流能量应
用技术调查专门委员会 编
陈国呈 译



科学出版社
www.sciencep.com

大电流能量 技术与应用

〔日〕电气学会大电流能量应
用技术调查专门委员会 编
陈国呈 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2004-7984 号

内 容 简 介

随着电力技术的发展,大电流能量技术被广泛用于各个领域,也作为推动社会进步、保持和改善生态环境的尖端技术备受相关专业专家及技术人员的瞩目。

本书从大电流能量技术的基础现象、直流大电流技术、交流大电流技术、脉冲大电流技术、大电流能量现象的高度分析技术、大电流能量测量技术等方面介绍大电流能量处理技术,并就核聚变、能量储存、磁流体发电、大容量加热、高辉度照明、超强磁场产生、超高压应用、高速飞翔体,以及电磁脉冲、电磁推进、放射性废弃物处理等方面阐述大电流能量技术的应用。

本书涉及的学科有电力学、高压电学、放电学、等离子学、核聚变学、电力电子学、流体力学、高分子化学、金属材料学等,知识覆盖面广,内容新颖,适合于从事相关工作的工程师、研究人员、高等学校教师及研究生等作为专业参考书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

大电流能量技术与应用/(日)电气学会大电流能量应用技术调查专门委员会编;陈国呈译. —北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-014000-1

I. 大… II. ①电…②陈… III. ①大电流技术-应用 IV. TM89

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 075279 号

责任编辑:崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面制作:来佳音

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2004 年 10 月第一次印刷 印张: 18

印数: 1—4 000 字数: 341 000

定 价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

大电流能量应用技术调查专门委员会成员

- 委员长** 稻叶次纪 (中央大学)
- 顾问** 原田达哉 (日本工业大学)
- 委员** 矶崎 优 (株式会社富士电机综合研究所)
双野高明 (日本原子能研究所)
井深真治 (东京工业大学)
入泽寿逸 (长冈技术科学大学)
植松真明 (株式会社明电舍)
加藤 茂 (日新电机株式会社)
河村达雄 (芝浦工业大学)
北川史郎 (核聚变科学研究所)
木村俊则 (三菱电机株式会社)
合田 丰 (财团法人电力中央研究所)
腰塚 正 (株式会社东芝)
佐藤康宏 (电子技术综合研究所)
铃木昌平 (株式会社日立制作所)
丹田 修 (昭和电线电缆株式会社)
林 重雄 (关西大学)
原口芳德 (东京电力株式会社)
古矢胜彦 (Nichicon 株式会社)
松村年郎 (名古屋大学)
宫本修治 (姫路工业大学)
森宫 脩 (日本工业大学)
- 干事** 大森宪一郎 (日本原子能研究所)
前山光明 (埼玉大学)
- 中途交接、协助者** 阿部充志 (株式会社日立制作所)
石井彰三 (东京工业大学)
石垣幸雄 (株式会社日立制作所)
石川雅之 (株式会社东芝)
一ノ瀬祐治 (株式会社日立制作所)
佐久川贵志 (株式会社明电舍)
笹尾博之 (三菱电机株式会社)
品川润一 (昭和电线电缆株式会社)
嶋田隆一 (东京工业大学)
铃木克己 (株式会社东芝)
竹田昭平 (电子技术综合研究所)
田中洋司 (株式会社日立制作所)
田 实 (Nichicon 株式会社)
二宫纪彦 (Nichicon 株式会社)
堀之内克彦 (三菱电机株式会社)
松井芳彦 (株式会社明电舍)
柳泽一二三 (株式会社明电舍)

注:委员所属截止日期为 1999 年 9 月。

译者序

本书的原著名曰《大电流能量工学》，纵观全书内容，译者取其译名为《大电流能量技术与应用》。

近年来，随着电能消费的不断增长和能量利用形态的高功能化，大电流能量技术正在电能的生产、传输、变换、控制等方面迅速崛起。除了以往的大电力输电、利用短路发电机的大电流试验、电化学工业的直流大电流技术外，还包括了核聚变技术、强磁场产生技术、磁能存储、电磁力应用、脉冲功率技术等各尖端技术领域。日本电气学会于1981年曾设立了“大电流技术”调查专门委员会，而1991年又改名为“大电流能量技术”调查专门委员会，可见其对“大电流能量”问题的重视程度。本书从大电流能量技术的基础现象、直流大电流技术、交流大电流技术、脉冲大电流技术、大电流能量现象的高度分析技术、大电流能量测量技术等方面阐述大电流能量技术，并就核聚变、能量储存、MHD(MagnetoHydroDynamics, 磁流体动力学)发电、电弧加热、等离子加热、感应加热、高辉度照明、超强磁场产生、超高压应用、高速飞翔体、电磁脉冲、电磁推进、放射性废弃物处理等方面阐述大电流能量技术的应用。

本书涉及的学科有电力学、高压电学、放电学、等离子学、核聚变学、电力电子学、流体力学、高分子化学、金属材料学等，覆盖面广，内容新颖，适合于从事相关工作的工程师、研究人员、高等学校教师及研究生等作为专业参考书或教材。

本书的出版得到了科学出版社有关部门的大力协助，并得到台达电力电子科教发展基金(2004年度)的支持。书稿的全部文字输入得到了束满堂、王任辉两位同志的全力帮助，许春雨同志也给予译者很多协助。译者谨借此机会向以上各位表示衷心的感谢。

如果本书的出版能对读者有所启迪，则将是译者的莫大欣慰。由于本书跨越的学科较多，限于译者自身从事的专业及时间、精力，书中可能存在疏忽、误解和欠妥之处，恳请读者不吝批评指正，不胜感激。

陈国呈

上海大学自动化系14信箱(200072)

前 言

近年来,电力技术在能量技术领域里越来越显示出其重要性。

众所周知,功率是可以用电压和电流的乘积表示的,因此,电流和电压是判别功率大小的两大重要要素。过去,大功率化是同时靠高电压和大电流两种手段来实现的。但是,从输电线等的绝缘耐力上看,提高电压是有限度的,因此,近年来大电流技术越来越显示出其重要性。

如今,大电流技术已广泛应用于以电力技术、核聚变技术、脉冲功率技术、电磁力应用技术等为主的能量领域乃至最尖端的技术领域。

但是,上述各领域的大电流技术已分别作为电力工学、高电压工学、放电工学、等离子工学、核聚变工学等的一个个分支发展起来,其间的许多关系还需要弄清楚。

为此,1981年日本电气学会又设立了“大电流技术”调查专门委员会。此后,对大电流技术作了全面、综合的调查,确立了学术体系,并于1992年出版了《大电流工学手册》,这是最早的成果。该手册作为从事大电流技术领域的研究人员和技术员的必备工具书而受到广泛欢迎,在较长一段的时间里都有重要参考价值。

从那以后大电流技术的发展仍备受瞩目,不光是大电流技术,而且大电流技术与能量的关系也越来越深。为此,电气学会专门委员会也改名为“大电流能量技术”调查专门委员会,从1991年开始实现了“大电流”和“能量”的融合。

本书是将上述成果汇编成册以《大电流能量技术与应用》为名出版的。它以原出版的《大电流工学手册》为基础,从基础到最新技术,收集了有关大电流能量技术的基础现象,直流、交流、脉冲的各大电流能量技术、超导技术、解析技术、测量技术、应用技术等,考虑到读者的需求又增加了相关的规格、参数等最新数据,使内容更加丰富。

本人相信,本书不仅是直接从事大电流能量技术领域的相关人员的必备参考书,而且对于从事电力工学、高电压工学、电弧等离子工学、核聚变工学、激光工学、超导工学、照明工学等的研究人员、技术人员来说也是必备的参考书,甚至对于大专院校的本科生、研究生等也都具有很高的参考价值。

如果本书通过电力工学、能量工学的讲解,能够作为推动社会进步、保持和改善生态环境的第一步有所贡献的话,作者将感到莫大荣幸。

大电流能量应用技术调查专门委员会

委员长 稻叶次纪

目 录

第 1 章 绪 论 1

参考文献	3
------------	---

第 2 章 大电流能量技术的基本现象 4

2.1 电磁场现象	4
2.1.1 磁场的计算与电感	4
2.1.2 电磁力	5
2.1.3 电磁感应故障	6
2.2 导电现象	7
2.2.1 物质的导电现象	7
2.2.2 金属的电阻	7
2.3 超导现象	9
2.3.1 超导的基础	9
2.3.2 超导线材、线圈	10
2.4 大电流的传输	11
2.4.1 低损耗传输线路与低电感传输线路	11
2.4.2 大电流用导体的电流容量、热应力和电磁力	15
2.5 电弧现象	20
2.5.1 高气压电弧物性	21
2.5.2 电弧放电的辐射能特性	21
2.5.3 电弧阳光柱的诊断	24
2.5.4 电弧熄灭现象的分析	24
2.5.5 喷流电弧的基本特性	25
2.6 等离子现象	26
2.6.1 等离子体的基本特性	26
2.6.2 等离子诊断	27
参考文献	29

第 3 章 直流大电流技术

32

3.1 直流大电流的产生	32
3.1.1 电 池	32
3.1.2 直流发电机	33
3.1.3 整流器	35
3.2 直流大电流的控制	37
3.2.1 直流发电机	38
3.2.2 半导体变换器	39
3.2.3 大容量化技术	41
3.3 直流大电流的切断	42
3.3.1 技术课题	42
3.3.2 切断方式	42
3.3.3 开发状况	44
3.4 直流大电流的传输	47
参考文献	48

第 4 章 交流大电流技术

49

4.1 交流大电流的产生	49
4.1.1 基于短路发电机的产生	49
4.1.2 基于 LC 的产生	51
4.2 交流大电流的控制	51
4.2.1 试验站的电流控制	51
4.2.2 时间、相位的控制	52
4.2.3 合成短路实验的控制	52
4.3 电力系统中的交流大电流现象	54
4.3.1 电力系统中短路电流的现状	54
4.3.2 电弧喷射的基础特性	55
4.3.3 电弧喷射特性在输配电设备上的应用	58
4.4 交流大电流的切断、限流	61
4.4.1 低压用断路器	61
4.4.2 高压用断路器	64
4.4.3 限流器	70

4.5 交流大电流的传送	74
4.5.1 交流大电流用电线与电流容量	74
4.5.2 减小阻抗的方法	75
4.5.3 强制冷却	77
4.5.4 交流用超导线	78
4.6 交流大电流设备	78
4.6.1 发电机	78
4.6.2 变压器	79
4.6.3 母线(bus)	80
参考文献	82

第 5 章 脉冲大电流技术 88

5.1 脉冲大电流能量发生装置	88
5.1.1 静电能量型电源	88
5.1.2 感应能量型电源	91
5.1.3 运动能量型电源	92
5.1.4 化学能量型电源	94
5.2 脉冲大电流能量的控制	96
5.2.1 起动开关与切断开关	96
5.2.2 放电型开关	96
5.2.3 半导体器件开关	99
5.2.4 熔断丝	100
5.2.5 等离子断开开关	101
5.2.6 磁开关	102
5.3 脉冲大电流能量的整形	104
5.3.1 脉冲整形线(PFL)、脉冲整形电路(PFN)	104
5.3.2 脉冲压缩	107
5.3.3 电流灭弧	109
5.3.4 脉冲功率系统	111
参考文献	115

第 6 章 大电流能量现象的高度分析技术 122

6.1 过渡电路分析	122
------------------	-----

6.1.1 过渡分析方法	122
6.1.2 各种电路分析软件的特点	123
6.1.3 使用 EMTP 的分析举例	124
6.2 磁场分析	126
6.2.1 基础公式及边界条件	126
6.2.2 使用有限元法的分析法	127
6.2.3 使用边元素的涡流分析例	128
6.2.4 电流密度分布分析例	129
6.3 电弧流体分析	130
6.3.1 稳定电弧	130
6.3.2 空气中电弧	134
6.3.3 断路器电弧	137
6.3.4 气流分析	137
参考文献	141

第 7 章 大电流能量测量技术

144

7.1 测量系统	144
7.2 接 地	145
7.3 噪声对策	147
7.4 直流大电流的测定	148
7.4.1 饱和型电流传感器	149
7.4.2 霍尔元件型直流电流传感器	149
7.4.3 光电流传感器	150
7.5 交流大电流的测定	152
7.5.1 分流器	152
7.5.2 电磁型电流传感器	154
7.5.3 光电流传感器	157
7.6 脉冲大电流的测定	158
7.6.1 脉冲大电流的测定	158
7.6.2 分流器	158
7.6.3 高频电流传感器	162
7.6.4 Rogowski 线圈	162
7.6.5 集电线圈	164
7.6.6 粒子束脉冲大电流的测定	165

7.6.7 雷击放电能量测量方法的开发	167
7.7 校正	171
参考文献	174

第 8 章 大电流能量应用技术 178

8.1 核聚变应用技术	178
8.1.1 核聚变装置的种类	178
8.1.2 磁封闭方式	179
8.1.3 惯性封闭方式	184
8.2 能量储存应用技术	190
8.2.1 大容量发电机	190
8.2.2 超导能量储存(SMES)	191
8.3 MHD 发电应用技术	197
8.3.1 MHD 发电	197
8.3.2 MHD 发电开发的动向	197
8.3.3 脉冲 MHD 发电	198
8.4 大容量发热应用技术	200
8.4.1 直接通电加热	200
8.4.2 电弧加热	201
8.4.3 等离子加热	202
8.4.4 感应加热	203
8.5 高辉度发光应用技术	206
8.5.1 灯的种类与光谱特征	206
8.5.2 灯的实用性能	207
8.5.3 电弧灯的应用领域	208
8.5.4 利用电弧等离子的高辉度照明技术	208
8.5.5 Z 箍缩光源	208
8.5.6 同步加速器辐射光	211
8.6 超强磁场产生技术	213
8.6.1 稳定强磁场的产生	213
8.6.2 脉冲超强磁场产生	215
8.6.3 磁场箍缩法	216
8.7 超高压力应用技术	217
8.7.1 闪烁能量与极超高压	217

8.7.2 物质的动态箍缩特性	218
8.7.3 利用动态箍缩方法产生极超高压(冲击波箍缩)	218
8.7.4 利用动态等熵箍缩产生超高压	219
8.7.5 超高压在产业机器上的应用	220
8.8 高速飞翔技术	222
8.8.1 电磁加速器的意义	222
8.8.2 电磁加速法	222
8.8.3 轨道炮的概要	223
8.8.4 轨道炮的研发状况	223
8.8.5 轨道炮存在的问题及其对策	224
8.9 电磁脉冲应用技术	225
8.9.1 EMC 与电磁脉冲	225
8.9.2 电磁脉冲模拟仿真	226
8.9.3 雷击模拟仿真	226
8.10 电磁推进应用技术	228
8.10.1 磁悬浮式铁路	228
8.10.2 电磁推进船	231
8.11 电弧等离子在环保方面的应用	232
8.11.1 电弧等离子处理的概要	232
8.11.2 电弧等离子对材料回收、再利用的应用	234
8.11.3 放射性废弃物处理	234
参考文献	237

第 9 章 相关技术规格、额定值 245

9.1 大电流能量装置的相关资料	245
9.1.1 大电流开关(控制)元件的相关资料	245
9.1.2 有关大电流测量的额定值和规格	249
9.2 安全基准	251
9.3 物理常数、物性	254
9.3.1 基础物理常数及元素周期表	254
9.3.2 物 性	256
参考文献	266

索 引	267
-----	-----

第 1 章 绪 论

随着电能消费的不断增长和能量利用形态的高功能化,大电流技术是一个在电能的产生、传输、变换、控制方面正在迅速崛起的领域。除了以往的大电力输电、利用短路发电机的大电流试验、电化学工业的直流大电流技术外,还包括了核聚变技术、强磁场产生技术、磁能存储、电磁力应用、脉冲功率技术等多个尖端技术领域^[1~3]。

从与能量工学的关系考虑,如图 1.1 所示,大电流技术可以分为两类:

- ① 各种能量形态与电能间的能量变换技术;
- ② 电能量的传输技术。

这里用到的术语“电能”是指在输电线和传送线路上由电压和电流的乘积所表示的电磁能的流量,量纲代表的是功率(power)。电能以外的主要能量形态及与之相关的技术如表 1.1 所示^[4~5]。

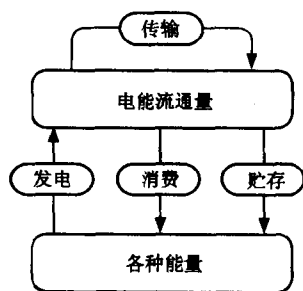


图 1.1 电能的流通

使用大电流的特征是,与表 1.1 中代表强度的电流变量 I 和代表数量的电荷变量 q 有关的①洛伦兹力,②磁场(磁能),③焦耳热、光能,④通过的电荷量等都很大会。而且,充分发挥其高可控性,大电流技术在轨道炮(洛伦兹力)、等离子控制(利用洛伦兹力的等离子压缩、平衡)、超导磁能存储 SMES(磁能)、电弧(arc)加热(焦耳热)、铝精炼(通过的电荷量)等设备系统中都能得到广泛应用。

但是,电能与其他许多能量的形态不同,其自身不能存储。为此,必须先将其暂时变换为其他形式的能量形态,以后再变换为电能进行利用。这种技术称为能量存储技术。存储技术既有像扬水发电、SMES 这样数小时范围的,也有比如使用电容器和线圈采用脉冲功率形式的从毫秒乃至微秒时间范围的。在进行设计和使用时要考虑到能量存储密度、能量存储效率(能量封闭时间 $\tau = \text{存储能量} / \text{损失功率}$)。

关于电能传输,除电能的空间移动之外,还包括频率、相位或阻抗变化引起的电能到电能的各种变换。该技术包括变电技术和利用各种开关的技术。

表 1.1 各种能量形态与电能间关系

能量形态	强度变量	数量变量	能 量	相关技术、设备
机械	力 F 转矩 τ	位移 x 角度 θ	$\frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^{2①}$ $\frac{1}{2} I \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^{2②}$	电动机, 粒子束, 轨道炮, 飞轮, 电磁成形
流体、热	压力 p 温度 T	体积 v 焓 s	$U^{③}$ (绝热) $H^{④}$ (等压)	等离子, 磁流体发电, 电阻, 断路器, 电弧
静电	电势差 V	电荷 q	$\frac{1}{2} E \cdot D$	电容器, 库仑力
磁	电流 I	磁通 ϕ	$\frac{1}{2} B \cdot H$	电感, SMES, 电磁铁, 洛伦兹力, 磁悬浮, 电磁推进
光	$h\nu$	光子数 N	辐射通量 (辐射强度, 辐射亮度)	灯, 电弧, 激光, X射线源, 太阳能电池
化学	化学势	反应物质量	$G^{⑤}$	各种电池, 炸药发电机

① m : 质量。② I : 惯性矩。③ 内部能量。④ 焓。⑤ 吉布斯自由能。

在图 1.2 和图 1.3 中, 根据“电压-电流, 能量-功率”的特征, 对这些典型的大电流设备系统或技术作了分类。由图可以看出, 就像阻抗的范围为 $10^{-3} \sim 10^3 \Omega$, 特征时间常数的范围为 $10^{-9} \sim 10^3 \text{ s}$ 一样, 虽说同是大电流能量技术, 但各种应用技术覆盖的参数范围很大。

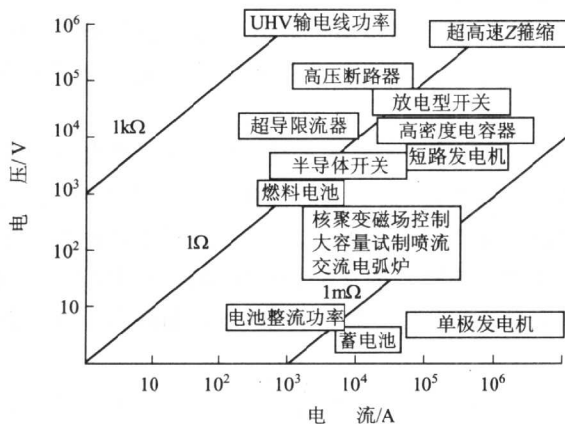


图 1.2 大电流能量设备的分类 (电流-电压)

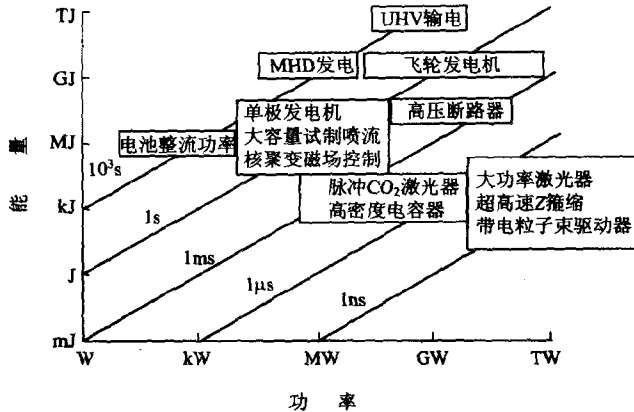


图 1.3 大电流能量设备的分类(功率-能量)

本书从第2章的大电流能量技术的基本现象入手,根据特征时间对大电流能量技术进行分类,即第3章为直流大电流技术,第4章为交流大电流技术,第5章为脉冲大电流技术,第6章为大电流能量现象的高度分析技术,第7章为大电流能量测量技术,第8章为大电流能量应用技术,第9章为相关技术规格、额定值。

参考文献

- [1] 電気学会・大電流応用技術調査専門委員会 編:大電流工学ハンドブック, コロナ社 (1992)
- [2] 大電流エネルギー基礎技術の現状と動向, 電学技報, No. 490 (1994)
- [3] 大電流エネルギー制御技術の現状と動向, 電学技報, No. 646 (1997)
- [4] A. Sommerfeld 著, 伊藤大介 訳:電磁気学, 講談社 (1969)
- [5] キッテル 著, 山下次郎, 堀地 充 共訳:熱物理学, 丸善 (1983)

第 2 章 大电流能量技术的基本现象

随着电气设备大容量化、大电流化,由此导致的电磁力和电磁感应故障问题越来越受到人们的关注。2.1 节就电磁场现象,特别是对磁场的计算方法进行阐述,它是电磁场分析的基础。

能够导电的物质有液体、固体、电离气体等。有关液体和固体的导电现象放在 2.2 节介绍,2.3 节介绍超导,2.4 节介绍低损耗或电感传输线路的处理方法。电离气体中,有关高气压电弧放在 2.5 节,而等离子放在 2.6 节作阐述,该等离子可以看成是完全电离气体,托卡马克(Tokamak)等离子就是一个典型例子。

2.1 电磁场现象

当导体中流有电流时,有必要知道导体的电感、电磁力以及波及到其他导体或电路的电磁感应故障有多大。这些现象都是由流入导体的电流所产生的磁场造成的,并随着电流的频率、导体的尺寸及形状、导体周围的金属物体或磁性体而变化。本节主要介绍磁场的计算方法,它是讨论问题的基础,然后以这些磁场计算为基础,简单介绍导体的电感、电磁力及电磁感应故障的求解方法。

2.1.1 磁场的计算与电感

1. 磁场的计算^[1]

当导体中流过的电流为直流时,只要考虑对导体周围磁性体的影响就可以了。在麦克斯韦电磁方程式中忽略位移电流时,磁场强度 H 和电流密度 J 之间存在如式(2.1)的关系。而且,磁矢量势 A 与磁通密度 B 之间有式(2.2)的关系, B 和 H 之间有式(2.3)的关系成立:

$$\operatorname{rot} H = J \quad (2.1)$$

$$B = \operatorname{rot} A \quad (2.2)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_s} \quad (2.3)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, μ_s 为相对磁导率。

由以上关系,可以求得下式:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_0\mu_s}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)=\mathbf{J} \quad (2.4)$$

由上式先求得磁矢量势 $\mathbf{A}$, 然后利用式(2.2)求出磁通密度 $\mathbf{B}^{[2,3]}$ 。

当流经导体(磁导率为 σ)的电流为交流或过渡电流时,要考虑到导体内电流分布的不均匀问题以及导体周围金属物体上存在的涡流电流 $\mathbf{J}_e=\sigma\mathbf{E}$ 的影响问题,即式(2.1)右边的 $\mathbf{J}$ 追加一个 $\mathbf{J}_e$ 从而得下式:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)=\mathbf{J}-\sigma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}-\sigma\operatorname{grad}\phi \quad (2.5)$$

式中, ϕ 为电位, 且 $\mathbf{E}=-\operatorname{grad}\phi$ 。

2. 磁场能量与电感^[1]

体积 G 内存储的磁能 U_m 可由下式表示:

$$U_m = \frac{1}{2} \int_G \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} d\mathbf{v} \quad (2.6)$$

假定磁场是由稳态电流产生的, 则利用式(2.2)及 $\operatorname{rot}\mathbf{H}=\mathbf{J}$ 的关系, 式(2.6)可以用 $\mathbf{A}$ 表示如下:

$$U_m = \frac{1}{2} \int_{\infty} \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} d\mathbf{v} \quad (2.7)$$

线性电路情况下, 电感可以由磁能 U_m 求出。自感 L 、电流 I 和磁能 U_m 间有如下关系:

$$\frac{1}{2}LI^2=U_m \quad (2.8)$$

2.1.2 电磁力^[1]

1. 电磁力的基础

当电流密度为 $\mathbf{J}$ 的导线位于磁通密度为 $\mathbf{B}$ 的磁场内时, 作用在导线上的力 $\mathbf{F}$ 可由式(2.9)表示。 $\mathbf{F}$ 的方向遵循弗莱明左手定则, 如图 2.1 所示。

$$\mathbf{F} = \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{B} d\mathbf{v} \quad (2.9)$$

另外, 利用恒流电路磁能 U_m 还可以由下式求出:

$$F_x = \frac{\partial U_m}{\partial X} \quad (2.10)$$

式中, X 为 $\mathbf{F}$ 方向的位移。

2. 两导线间作用的电磁力

如图 2.2 所示, 在距离为 d 的两根无限长平行导线

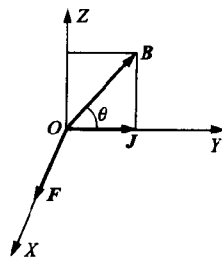


图 2.1 电磁力、电流和磁场的关系