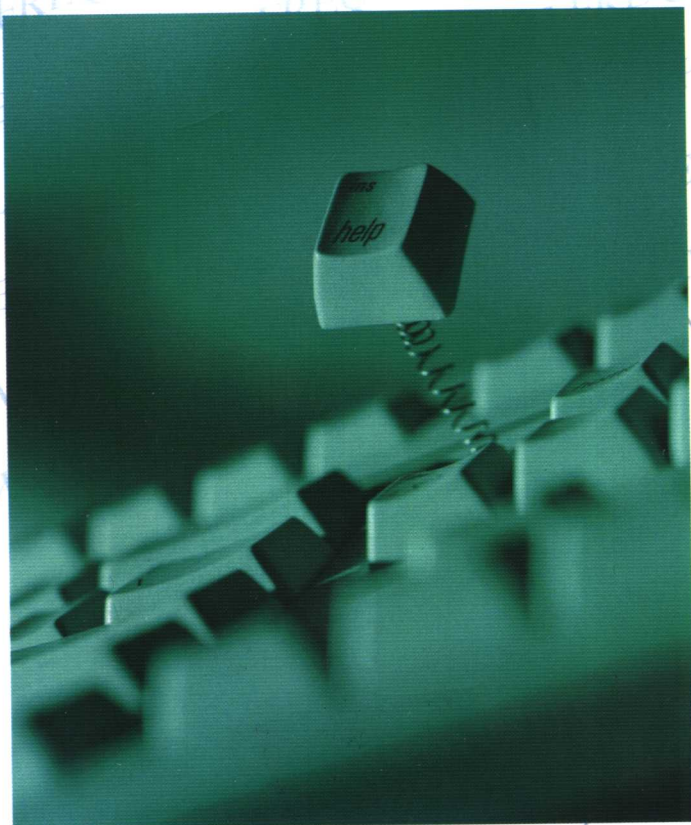


万水
ANSYS 技术丛书

ANSYS 10.0

工程电磁分析技术 与实例详解

阎照文 等编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS 10.0 工程电磁分析 技术与实例详解

阎照文 等编著

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书以 ANSYS 的最新版 ANSYS 10.0 为基础,对 ANSYS 的电磁场有限元分析进行全面介绍。内容包括: ANSYS 电磁场分析概述, ANSYS 电磁场理论基础, ANSYS 电磁场基本分析过程, ANSYS 建模方法, ANSYS 二维电磁场分析, ANSYS 三维静态磁场分析——标量法, ANSYS 三维静态、谐波和瞬态磁场分析——矢量法, ANSYS 三维静态、谐波和瞬态磁场分析——棱边单元法, ANSYS 高频电磁场分析, ANSYS 电流场分析, ANSYS 静电场分析, ANSYS 电路分析, ANSYS 耦合场分析, ANSYS 磁宏和远场单元。

本书给出了各种方法的分析要点,每种分析方法都给出一些分析过程很详细的实例。本书既适合于初学者使用,又可以作为具有一定分析经验的科技人员的手册使用。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 10.0 工程电磁分析技术与实例详解 / 阎照文等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

(万水 ANSYS 技术丛书)

ISBN 7-5084-4085-4

I. A... II. 阎... III. 电磁场—有限元分析—应用程序, ANSYS 10.0 IV. O441.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 113334 号

书 名	ANSYS 10.0 工程电磁分析技术与实例详解
作 者	阎照文 等编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 31 印张 760 千字
版 次	2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	56.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

ANSYS 是国内非常流行的有限元分析商业软件包, 可以进行结构分析、热分析、流体分析、电磁场分析和多物理场分析, 是惟一真正实现多场耦合的 CAE 软件。虽然 ANSYS 国内用户已达 1600 余家, 但许多用户还处于初级使用阶段, 没有发挥出 ANSYS 的强大功能, 特别是在电磁场应用方面更是如此。这往往不是用户对 ANSYS 的熟练使用问题, 而是由于用户没有深厚的电磁场理论功底所造成的结果。作者长期从事电磁场理论及其数值计算方法的研究, 长期使用 ANSYS 开发工程项目, 在 ANSYS 的理解与应用方面积累了一定的经验, 深知只有对电磁场理论深入理解和熟练掌握 ANSYS, 才能达到游刃有余、走向自由王国的境界。

目前国内介绍 ANSYS 应用方面的书不少, 但全面介绍电磁场分析方面的书是个空白, 作者总结多年使用 ANSYS 的成功经验, 把 ANSYS 在电磁场应用方面的资料编著成书, 并经过作者的加工与解释, 以便更符合汉语的习惯, 也能使读者更容易理解, 因此, 可以说本书是利用 ANSYS 开发电磁场工程项目的心得体会与成果总结, 以给从事电磁场计算方面的科技人员提供一个参考。

本书以 ANSYS 的最新版 ANSYS 10.0 为基础, 对 ANSYS 的电磁场有限元分析进行全面介绍。内容包括: ANSYS 电磁场分析概述, ANSYS 电磁场理论基础, ANSYS 电磁场基本分析过程, ANSYS 建模方法, ANSYS 二维电磁场分析, ANSYS 三维静态磁场分析——标量法, ANSYS 三维静态、谐波和瞬态磁场分析——矢量法, ANSYS 三维静态、谐波和瞬态磁场分析——棱边单元法, ANSYS 高频电磁场分析, ANSYS 电流场分析, ANSYS 静电场分析, ANSYS 电路分析, ANSYS 耦合场分析, ANSYS 磁宏和远场单元。本书既包含 ANSYS 的电磁场基本理论、基本操作过程和使用方法, 也有大量的工程应用实例。

本书试图既满足初学者的学习需要, 又满足高级工程开发人员的要求, 但如何在两者之间权衡, 颇费思索, 因此在内容安排方面, 篇幅比较大, 内容比较全面, 几乎覆盖了电磁场方面的所有内容。本书例题较多, 以供从事不同专业方向的读者取舍。读者只有在掌握 ANSYS 的基本操作后, 完成大量的练习, 才能理解 ANSYS 的真谛。由于时间和篇幅所限, 还有不少好的例题没有列入本书, 特别是耦合场和高频方面的例子比较少, 这留待以后修订时补充进去。

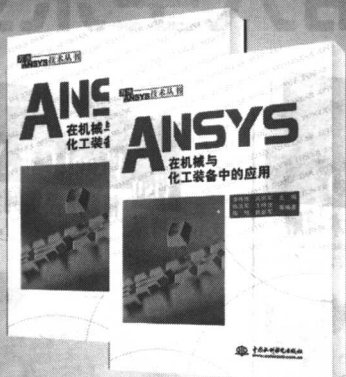
对初学者来说, 应该按照第 3 章中的例子反复练习, 慢慢理解 ANSYS 的内涵, 然后再阅读后面的内容, 独立完成其他各章中的例子。对于已经有 ANSYS 基础的工程开发人员来说, 主要是要理解各种方法的含义、适用范围、边界条件和加载方面的异同, 多计算一些例子, 并与理论值或实测值进行比较, 确保使用无误后, 再针对工程项目进行开发。另外, 不要忽视理论知识, 在每做完一个例题后, 要在第 2 章找到所使用的理论知识,

细心体味所使用的方法、理论结果和 ANSYS 操作方法，这会带来意想不到的收获。总之，必须在 ANSYS 上下大功夫，做大量的练习，细细品味 ANSYS 的魅力，才能避免因 ANSYS 使用不当而造成的错误。

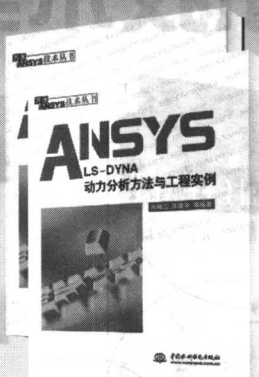
在本书的编写过程中，得到了北京航空航天大学苏东林教授的关心和支持，得到了王向晖博士、刘焱博士、王冰切博士、翟禹博士、韩轶峰硕士、张兰兰硕士、付路硕士的协助，同时也得到了安世亚太公司北方区技术经理蔡鹏先生、EMBU 产品经理贾云峰博士的支持，在此向他们表示感谢。

由于编著者水平有限，加之时间紧迫，错误与缺点在所难免，欢迎读者批评指正，同时也欢迎与作者进行合作研究，联系地址：yanzhaowen@buaa.edu.cn。

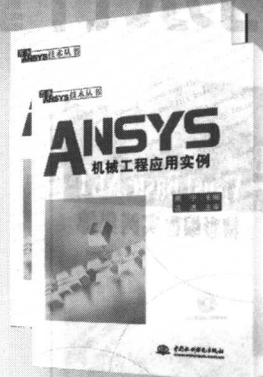
阎照文
于北京航空航天大学
2006 年 8 月



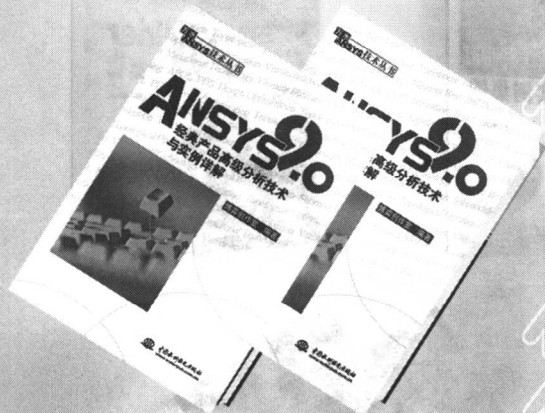
书号: ISBN 7-5084-3541-9
定价: 45.00 元



书号: ISBN 7-5084-3440-4
定价: 38.00 元



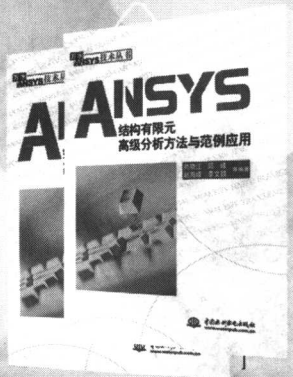
书号: ISBN 7-5084-3795-0
定价: 46.00 元



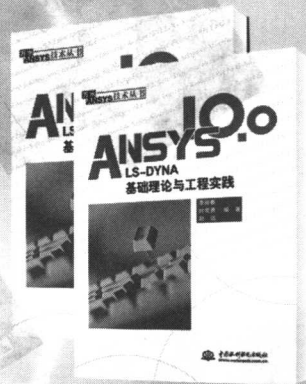
书号: ISBN 7-5084-3288-6
定价: 48.00 元



书号: ISBN 7-5084-3542-7
定价: 54.00 元



书号: ISBN 7-5084-3338-6
定价: 45.00 元



书号: ISBN 7-5084-3644-x
定价: 48.00 元



北京万水电子信息有限公司

Beijing Multi-Channel Electronic Information Co., Ltd.

地址: 北京市海淀区长春桥路5号新起点嘉园4号楼
1706室

电话: 010-82562819

传真: 010-82564371

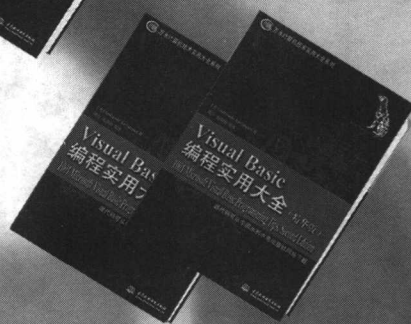
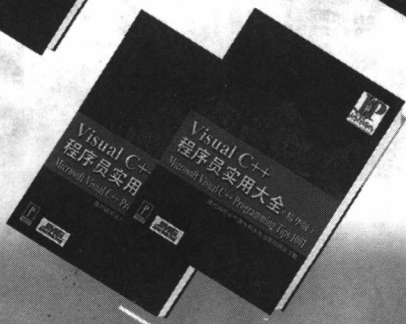
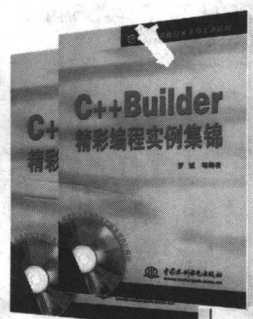
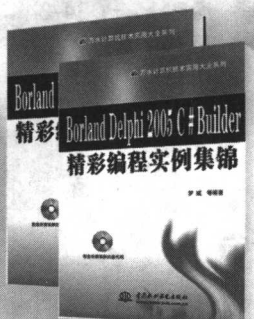
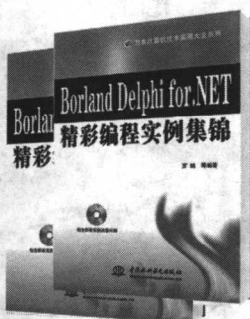
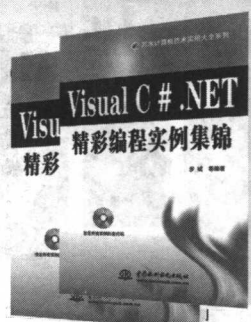
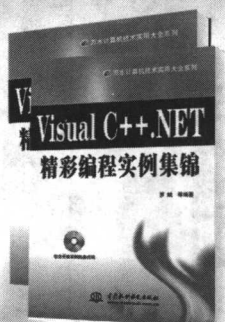
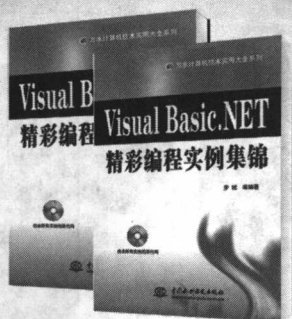
邮编: 100089

E-mail: mchannel@263.net



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水计算机技术实用大全系列



北京万水电子信息有限公司
Beijing Multi-Channel Electronic Information Co., Ltd.

地址: 北京市海淀区长春桥路5号新起点嘉园4号楼
1706室

电话: 010-82562819

传真: 010-82564371

邮编: 100089

E-mail: mchannel@263.net

目 录

前言

第 1 章	ANSYS 电磁场分析概述	1
1.1	ANSYS 概述	1
1.2	电磁场分析对象	1
1.3	ANSYS 怎样分析磁场	2
1.4	稳态、谐波和瞬态磁场分析	7
1.5	关于棱边单元、标量位、矢量位方法的比较	7
1.5.1	2-D 和 3-D 磁场分析	8
1.5.2	磁标量位方法	8
1.5.3	矢量位分析方法	8
1.5.4	棱边单元方法	8
1.5.5	棱边单元法与矢量位方法的比较	8
1.5.6	静态分析	9
1.6	电磁场单元概述	10
第 2 章	ANSYS 分析理论基础	12
2.1	电磁场理论基础	12
2.1.1	标量磁位法	14
2.1.2	求解方法	14
2.1.3	矢量磁位法	16
2.1.4	棱边通量自由度	17
2.1.5	节点矢量位法的限制	17
2.1.6	用复数形式表示的谐波分析	18
2.1.7	非线性时间—谐波磁场分析	19
2.1.8	电标量位法	20
2.2	场量值的计算	21
2.2.1	标量磁位结果	21
2.2.2	矢量磁位结果	22
2.2.3	磁力	22
2.2.4	磁分析中的焦耳热	24
2.2.5	电标量位结果	25
2.2.6	静电力	26
2.3	电压激励磁场分析和电路激励磁场分析	26
2.3.1	电压激励磁场问题	26

2.3.2	电路激励磁场问题	27
2.4	高频电磁场仿真	27
2.4.1	高频电磁场 FEA 原理	27
2.4.2	边界条件和完全匹配层 (PML)	28
2.4.3	激励源	30
2.4.4	高频参数的计算	31
2.5	用 LMATRIX 和 SENERGY 宏命令计算电感、通量和能量	39
2.5.1	微分电感的定义	40
2.5.2	电感计算方法回顾	41
2.5.3	使用的电感计算方法	41
2.5.4	变压器和电机感应电压	41
2.5.5	绝对通量计算	42
2.5.6	电感计算	42
2.5.7	绝对能量计算	42
2.6	电容计算	43
2.7	电导计算	44
2.8	耦合效应	45
2.8.1	单元	45
2.8.2	耦合方法	46
第 3 章	ANSYS 基本操作过程	54
3.1	建立模型	54
3.1.1	指定作业名和分析标题	54
3.1.2	选择分析类型	55
3.1.3	定义单元的类型	56
3.1.4	定义单元实常数	56
3.1.5	定义材料特性	56
3.1.6	创建几何模型	57
3.2	加载和求解	59
3.2.1	加载	59
3.2.2	求解	60
3.3	查看分析结果	62
3.3.1	将数据结果读入数据库	62
3.3.2	在 POST1 中观察结果	62
第 4 章	ANSYS 建模方法	67
4.1	坐标系	67
4.1.1	总体和局部坐标系	67
4.1.2	显示坐标系	68
4.1.3	节点坐标系	68
4.1.4	单元坐标系	68

4.1.5	结果坐标系	68
4.2	工作平面	69
4.2.1	生成一个工作平面	69
4.2.2	增强的工作平面	69
4.3	实体建模	70
4.3.1	用自底向上的方法建模	71
4.3.2	用自顶向下的方法建模	73
4.3.3	用布尔运算雕刻实体模型	74
4.3.4	移动和拷贝实体模型	76
4.3.5	实体模型图元的缩放	76
4.3.6	质量和惯量的计算	77
4.4	对实体模型进行网格划分	77
4.4.1	定义单元属性	77
4.4.2	网格划分控制	77
4.4.3	实体模型的网格划分	78
4.4.4	改变网格	80
4.5	修改模型	80
4.6	直接生成	81
4.6.1	定义节点	81
4.6.2	定义单元	81
4.7	选择和组件	82
4.7.1	选择实体	83
4.7.2	将几何体组集成组件与部件	84
4.8	创建几何显示	85
4.8.1	创建实体模型显示	85
4.8.2	改变几何显示的说明	85
4.9	创建几何模型结果显示	86
4.9.1	创建结果的几何显示	86
4.9.2	改变 POST1 结果显示规范	87
第 5 章	ANSYS 二维电磁场分析	88
5.1	2-D 静态磁场分析	88
5.1.1	2-D 静态磁场分析的基本步骤	88
5.1.2	例题分析	100
5.2	2-D 谐波 (AC) 磁场分析	156
5.2.1	2-D 谐波 (AC) 磁场分析的基本过程	156
5.2.2	例题分析	163
5.3	2-D 瞬态磁场分析	184
5.3.1	2-D 瞬态磁场基本过程	184
5.3.2	例题分析	186

第 6 章 ANSYS 三维静态磁场分析——标量法	197
6.1 标量法三维静态磁场分析基本过程	197
6.1.1 创建物理环境	197
6.1.2 设置 GUI 菜单过滤	197
6.1.3 定义材料属性	197
6.1.4 建立模型	197
6.1.5 施加边界条件和载荷	199
6.1.6 边界条件	199
6.1.7 求解	199
6.1.8 后处理	200
6.2 例题分析	200
第 7 章 ANSYS 三维静态、谐波和瞬态磁场分析——矢量法	215
7.1 节点法 (MPV) 3-D 静态磁场分析	215
7.2 节点法 (MPV) 3-D 谐波磁场分析	228
7.2.1 建立 3-D 谐波磁场分析的物理环境	228
7.2.2 加载和求解	232
7.2.3 观察结果	232
7.3 节点法 (MPV) 3-D 瞬态磁场分析	232
7.3.1 建立 3-D 瞬态磁场分析的物理环境	232
7.3.2 加载和求解	233
7.3.3 观察结果	233
7.4 标势法和矢量法联合使用	233
7.4.1 建立混合区域的模型	233
7.4.2 施加载荷、求解混合模型	234
7.4.3 观察结果	234
第 8 章 ANSYS 三维静态、谐波和瞬态磁场分析——棱边单元法	248
8.1 3-D 静态磁场分析	248
8.1.1 棱边法中用到的单元	248
8.1.2 不同物理区域的特性	248
8.1.3 完成一个棱边法静态场分析	248
8.1.4 观察结果	249
8.1.5 例题分析	249
8.2 3D 谐波磁场分析	279
8.2.1 定义和设置模型的物理区域	279
8.2.2 速度效应	281
8.2.3 3-D 谐波磁场分析的步骤	282
8.2.4 观察结果	282
8.2.5 例题分析	282
8.3 棱边法 3-D 瞬态磁场分析	291

8.3.1	3-D 瞬态磁场分析的步骤	291
8.3.2	观察结果	292
第 9 章	ANSYS 高频电磁场分析	293
9.1	高频电磁场的有限元分析	293
9.2	高频电磁场分析中用到的单元	293
9.3	高频电磁场谐波分析	294
9.3.1	建立物理环境	294
9.3.2	建立模型、说明区域特性和剖分	294
9.3.3	施加边界和激励 (载荷)	294
9.3.4	求解高频谐波分析	300
9.3.5	高频谐波分析后处理	301
9.4	高频电磁场模态分析	303
9.5	例题分析	303
第 10 章	ANSYS 电流场分析	339
10.1	稳态电流传导分析	339
10.1.1	建立模型	339
10.1.2	加载和求解	339
10.1.3	观察结果	340
10.1.4	多导体系统提取电导	340
10.2	谐波准静态电场分析	342
10.2.1	建立模型	342
10.2.2	施加载荷和求解	342
10.2.3	观察结果	343
10.3	瞬态准静态电场分析	343
10.4	例题分析	344
第 11 章	ANSYS 静电场分析	374
11.1	h 方法静电场分析	374
11.1.1	h 方法静电场分析所用的单元	374
11.1.2	h 方法静电场分析的步骤	374
11.1.3	多导体系统电容的提取	376
11.1.4	开域边界的 Trefftz 方法	378
11.2	p 方法静电场分析	378
11.2.1	p 方法的优点	378
11.2.2	使用 p 方法	378
11.3	例题分析	380
第 12 章	ANSYS 电路分析	407
12.1	使用 CIRCU124 单元	407
12.2	使用 CIRCU125 单元	408
12.3	使用电路建模程序	408

12.4	避免电路不合理	408
12.5	静态 (DC) 电路分析	409
12.5.1	建立静态电路分析模型	409
12.5.2	加载和求解	409
12.5.3	观察结果	409
12.6	谐波 (AC) 电路分析	409
12.7	瞬态电路分析	410
12.8	例题分析	410
第 13 章	ANSYS 电磁耦合场分析	429
13.1	耦合场分析的定义	429
13.2	耦合场分析的类型	429
13.3	顺序耦合场分析	429
13.4	ANSYS 多场 (TM) 求解器	431
13.5	直接耦合场分析	432
13.5.1	热—电分析	433
13.5.2	压电分析	433
13.5.3	压阻分析	433
13.5.4	磁—结构分析	434
13.5.5	电机械分析	434
13.6	耦合电路仿真	434
13.6.1	电磁—电路仿真	434
13.6.2	电机械—电路仿真	438
13.6.3	压电—电路仿真	439
13.7	例题分析	439
第 14 章	ANSYS 磁宏和远场单元	477
14.1	磁宏	477
14.1.1	电磁宏	477
14.1.2	使用电磁宏	478
14.2	远场单元	480
14.2.1	远场单元	481
14.2.2	使用远场单元注意的事项	481

第 1 章 ANSYS 电磁场分析概述

1.1 ANSYS 概述

ANSYS 公司成立于 1970 年，致力于工程仿真软件和技术的研究，在众多行业被全球的工程师和设计师广泛采用。ANSYS 公司总部位于美国宾夕法尼亚州的匹斯堡，全球拥有 25 个代理，大约 600 员工在 40 多个国家销售其产品。ANSYS 能进行结构、流体、热、电磁以及耦合场分析等，是最早通过 ISO9001 认证的软件。目前最新版本是 ANSYS 10.0。

1.2 电磁场分析对象

利用 ANSYS/Emag 或 ANSYS/Multiphysics 模块中的电磁场分析功能，ANSYS 可分析计算下列设备中的电磁场：

- 电力发电机
- 变压器
- 螺线管传动器
- 电动机
- 磁成像系统
- 图像显示设备传感器
- 回旋加速器
- 磁带/磁盘驱动器
- 波导
- 谐振腔
- 连接器
- 天线辐射
- 滤波器

在一般的电磁场分析中人们关心的典型的物理量为：

- 磁通密度
- 磁场强度
- 磁力及磁矩
- 阻抗
- 电感
- 涡流
- 能量损耗
- 磁漏
- S-参数
- 品质因子
- 回波损耗
- 特征频率

存在电流、永磁体 and 外加场都会激励起需要分析的磁场。

一般来说，电磁分析中元器件的特性可以用电特性和磁特性加以分类，如图 1-1 所示。

可能的电特性：

- 物体中不存在电流。
- 存在实心导体、电流，没有涡流效应。
- 绞线导体，没有涡流。
- 实心导体，存在涡流（只对谐波或瞬态分析）。

磁特性包括：

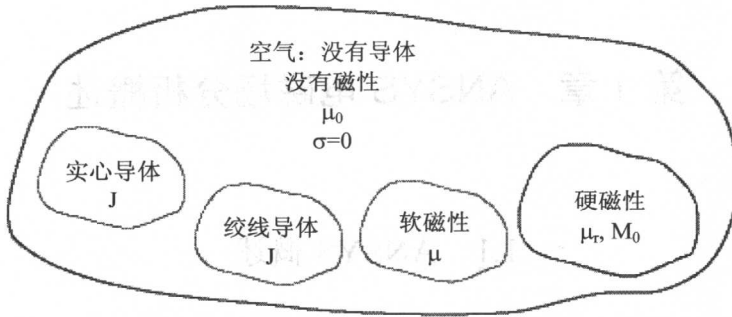


图 1-1 电磁特性区域分类

- 非磁性：典型的有空气、铜、铝。
- 软磁性：典型的是铁或钢。
- 硬磁性：典型的是钐、钴、铝镍钴合金。

电磁特性也可以是上述两种特性的组合。

1.3 ANSYS 怎样分析磁场

ANSYS 以 Maxwell 方程组作为电磁场分析的出发点。有限元方法计算的未知量（也称自由度）主要是磁位或电位。其他诸如磁场通量密度、电流密度、能量、力、损耗、电感和电容可以由这些自由度导出。根据用户所选择的单元类型和单元选项的不同，自由度可以是标量磁位、矢量磁位或边界通量，也可以是非时间积分电位和时间积分电位。

根据分析类型、材料特性和分析的物理情况，ANSYS 提供几种分析方法。电磁分析可以与电路、热传递、机械或流体分析进行耦合。

低频电磁场分析中可能的选项列在表 1-1 至表 1-5 中，高频电磁场分析见“第 9 章 ANSYS 高频电磁场分析”。

为了理解用户应该选用哪种方法，就需要明白电流是怎样加到模型上去的。下面的图形显示了基本的 3-D 电流载荷方式。这些载荷方式在后面的表中也有列出。

对图 1-2 的情况，通过体载荷（关于载荷的概念见“第 3 章 ANSYS 基本操作过程”）可以把电流密度施加到每个单元上（BFE,,JS）。这是施加电流密度时比较常用的情况。

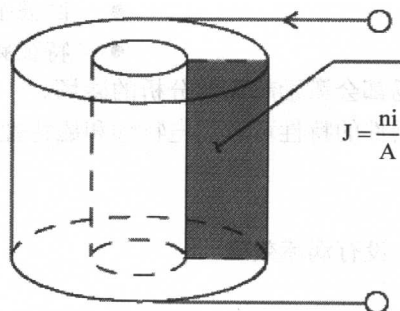


图 1-2 电流馈电绞线圈——已知电流密度

图中：J 为电流密度，n 为线圈匝数，i 为线电流，A 为线圈横截面积。

在图 1-3 中, 电流载荷是通过 SOURC36 单元形成的简单线圈馈电的。这种线圈已经定义好几何形状, 只需定义位置和电流大小, 不需要创造线圈的有限元模型和剖分线圈。SOURC36 单元一般用在标量法中。

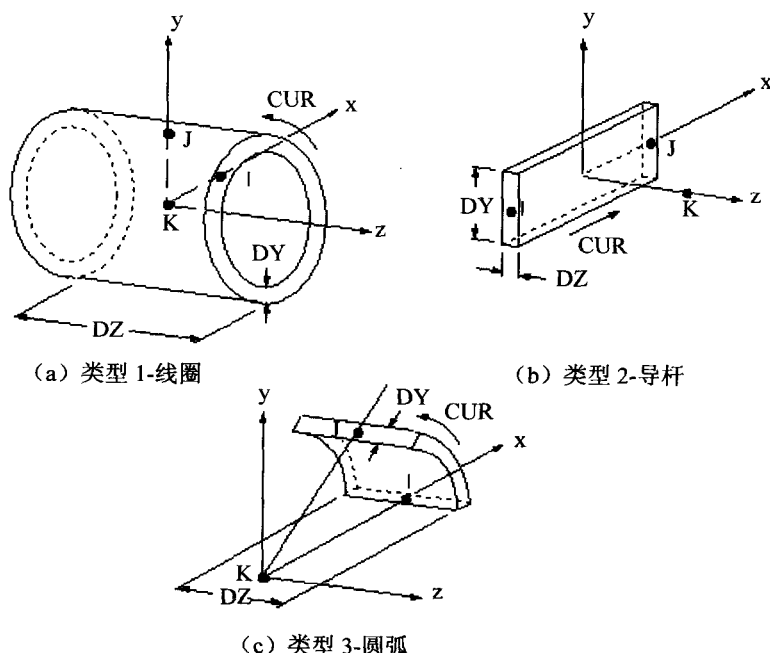


图 1-3 SOURC36 单元: 电流馈电绞线导体

图 1-4 是电流馈电实心导体, 已知导体总的电流。加载方法是耦合一端 VOLT, 然后在任一节点上加总电流。这种情况在电解槽电磁场计算中经常用到。

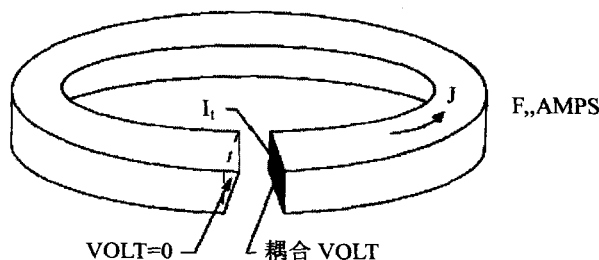


图 1-4 电流馈电实心导体: 已知总电流

图 1-5 是电压馈电的实心导体, 已知电压值, 在导体两端施加电位即可。

图 1-6 是电路馈电的实心导体, 耦合电压自由度, 然后把任一节点连接到电路上。

表 1-1 至表 1-5 总结了各种分析方法的物理区域、单元和载荷选项。如果它们还没有理解, 可以先做练习和实例分析, 检查是否和表中的选项一致, 找到分析中存在的问题, 这样就会理解这些表格的有用之处。

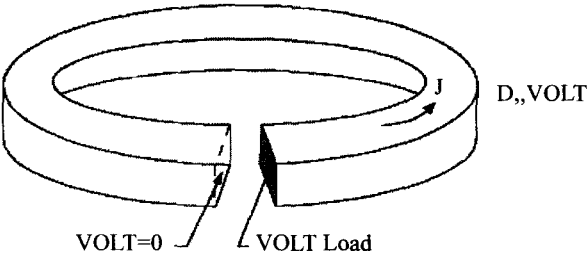


图 1-5 电压馈电实心导体：已知电压

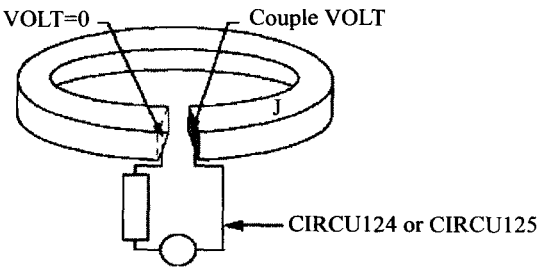


图 1-6 电路馈电实心导体

表 1-1 方法比较

方法	导体模型	维数	应用范围	单元类型	分析类型
磁标量法 (MSP)	SOURC36 载流绞线导体 馈电——线圈不需要剖分，不能位于剖分区域	3-D	没有涡流的静磁分析	SOLID5 SOLID96 SOLID98	静态
节点法 (MVP)	电流、电压或电路供电导体块——线圈剖分作为模型的一部分	2-D 3-D	静态磁场，涡流分析。不推荐使用在磁区	SOLID97 PLANE53 PLANE13	静态、谐波、瞬态
棱边法	允许绞线和块状导体。支持 SOURC36 载荷、电流、电路和电压馈电，以及直流加载	3-D	静态磁场，涡流分析。允许使用在磁区	SOLID117	静态、谐波、瞬态

表 1-2 三维棱边元方法

3-D 棱边方法：使用 SOLID117 单元，除了注释中的情况外其他情况 KEYOPT(1)=0						
物理区域	电流	磁材料特性	电材料特性	DOFs	当前载荷	注释
非磁性区(空气、铜、铝)	无	MURX (Y,Z) = 1		AZ	N/A	
软磁区(典型为铁或钢)	无	MURX (Y,Z) > 1 (线性) 或 B-H 曲线 (非线性)		AZ	N/A	