

ANSYS

No Boundaries

ANSYS

电磁场分析指南



2000年1月

ANSYS 中国



Anslys Inc.

201 Johnson Road
Houston, PA 15342

Underwriters Laboratories Inc.® (UL) issues this certificate to the Firm named above, after assessing the Firm's quality system and finding it in compliance with

ISO 9001:1994

EN ISO 9001:1994; BS EN ISO 9001:1994; ANSI/ASQC Q9001:1994

for the following scope of registration

7372 (US) : Prepackaged Software

The design, development, production, and support of commercial and customized software products, and training for engineering analysis and design. The provision of Quality Assurance and verification services for software products.

This quality system registration is included in UL's Directory of Registered Firms and applies to the provision of goods and/or services as specified in the scope of registration from the address(es) shown above. By issuance of this certificate the firm represents that it will maintain its registration in accordance with the applicable requirements. This certificate is not transferable and remains the property of Underwriters Laboratories Inc. ®.

File Number: A3725

Volume: 1

Issue Date: May 4, 1995

Revision Date: April 18, 1997

Renewal Date: July 4, 1995

S. Joe Rhatis
Vice President
Follow-Up Services



Accredited by
Road voor
Accreditatie



美国 ANSYS 公司北京办事处
地址: 北京市朝阳区光华路 7 号
汉威大厦 11 层 B2
电话: 010-65811940~1946
传真: 010-65811947
邮编: 100004

美国 ANSYS 公司上海代表处
地址: 上海市东安路 8 号
青松城大酒店 721/723/725 室
电话: 021-64435309~5510
传真: 021-64431672
邮编: 200032

美国 ANSYS 公司成都代表处
地址: 成都市大科甲巷 8 号
利都广场 A 座 730~733 室
电话: 028-6671505~506, 6655507
传真: 028-6669252
邮编: 610016

目 录

第一章 电磁场分析简介	1
一、在电磁场分析中要计算的量	1
二、电磁场的来源	1
三、什么时候要用二维分析?	2
四、什么时候要用三维分析?	2
五、自由度情况	2
六、ANSYS 程序中磁场分析的类型	2
七、什么是磁标势法?	2
八、什么是磁矢势(MVP)法?	3
九、什么是基于单元边的分析?	3
十、高频电磁分析	4
十一、电磁场单元概述	4
第二章 2-D 静态磁场分析	5
一、静态磁场的来源	5
二、二维静态磁场分析中要用到的单元:	5
三、静态磁场分析的步骤	6
四、算例——2-D 螺线管致动器内静态磁场的分析	21
第三章 2-D 谐波 (AC) 磁场分析	28
一、什么是谐波磁场分析?	28
二、线性与非线性谐波分析	28
三、二维谐波磁场分析中要用到的单元	28
四、创建 2-D 谐波磁场的物理环境	29
五、建立模型, 划分网格, 赋予特性	32
六、加边界条件和励磁载荷	32
七、求解	34
八、观察结果	36
九、算例——2-D 自由空间线圈的谐波磁场的分析	40
十、算例——二维非线性谐波分析	46
第四章 2-D 瞬态磁场分析	48
一、瞬态磁分析的概念	48

二、2-D 瞬态磁场中用到的单元	48
三、创建 2 - D 瞬态磁场分析的物理环境	48
四、建立模型, 划分网格, 赋予特性	48
五、加边界条件和励磁载荷	48
六、求解	50
七、后处理	52
八、算例--- 2-D 螺线管致动器内瞬态磁场的分析	53
第五章 3-D 静态磁场分析 (标量法)	61
一、在 3-D 静态磁场分析 (标量法) 中要用到的单元	61
二、磁标势 (MSP) 法介绍	61
三、3-D 静态标势分析的步骤	62
四、算例——铁磁导体	69
五、算例——3 - D 静态磁分析例题.....	71
第六章 3 - D 静态磁场分析 (基于单元边的方法)	75
一、何时使用基于单元边的分析方法	75
二、基于单元边的方法中要用到的单元	75
三、用基于单元边方法进行静态分析的步骤	76
四、算例----用基于单元边的方法计算电机沟槽中的磁场分布	77
第七章 3 - D 谐波磁场分析 (基于单元边的方法)	83
一、谐波问题中终端条件的处理	83
二、3-D 谐波磁场分析 (基于单元边的方法) 的步骤	85
三、算例: 用基于单元边的方法计算电机沟槽中的磁场分布	88
第八章 3 - D 瞬态磁场分析 (基于单元边的方法)	90
一、3-D 瞬态磁场分析 (基于单元边的方法) 的步骤	90
第九章 3-D 静态、谐波和瞬态分析 (基于节点的方法)	94
一、基于节点法 (MPV) 的 3D 静态磁场分析	94
二、基于节点法 (MPV) 的 3D 谐波磁场分析	97
三、基于节点法 (MPV) 的 3D 瞬态磁场分析	100

四、标势法和矢势法联合使用	101
第十章 高频电磁场分析	103
一、高频电磁场分析简介	103
二、高频电磁场分析中用到的单元	103
三、高频问题的处理方式	103
四、谐波高频电磁场分析的步骤	105
五、模态频率分析	113
六、算例——同轴波导的高频电磁场分析	114
第十一章 磁宏	117
一、什么是磁宏?	117
二、如何使用磁宏	118
第十二章 远场单元	129
一、远场单元简介	129
二、远场单元	129
三、使用远场单元的注意事项	130
第十三章 电场分析	132
一、电场分析要用到的单元	132
二、稳态电流传导分析的步骤	133
第十四章 静电场分析 (h 方法)	135
一、什么是静电场分析?	135
二、h 方法静电场分析中所用单元	135
三、h 方法静电场分析的步骤	136
四、多导体系统求取电容	139
五、开放边界的 Trefftz 方法.....	141
六、用 h 方法进行静电场分析的实例.....	143
七、一个电容计算实例 (命令方法)	145
八、用 Trefftz 方法做一个开放边界模型的静电分析 (命令方法)	147

第十五章 静电场分析 (P 方法)	150
一、P 方法分析定义.....	150
二、使用 P 方法的优点	150
三、使用 P 方法	150
四、一个 P 方法静电分析实例.....	159
第十六章 电路分析	163
一、什么是电路分析	163
二、使用 CIRCU124 单元	163
三、使用电路建模程序	165
四、避免电路不协调	166
五、静态 (直流) 电路分析	168
六、谐波 (交流) 电路分析	169
七、瞬态电路分析	170
八、谐波电路分析算例 (命令方式)	173
第十七章 其它分析选项和求解方法	176
一、引言	176
二、2-D 静磁分析加载选项	176
三、2-D 静磁分析的另外一种求解方式	178
四、2-D 或 3-D 谐波磁分析 (MVP 方法) 的加载选项	180
五、2-D 或 3-D 谐波磁分析 (MVP 方法) 的载荷步选项	180
六、2-D 或 3-D 瞬态磁分析 (MVP 方法) 的加载选项	180
七、2-D 或 3-D 基于节点的瞬态磁分析 (MVP 方法) 载荷步选项	181
八、3-D 静磁分析 (标量方法) 的加载选项	182
九、3-D 标量静磁分析 (RSP 方法) 的另外一种求解方式	183
十、3-D 标量静磁分析 (DSP 方法) 的另外一种求解方式	184
十一、3-D 标量静磁分析 (GSP 方法) 的另外一种求解方式	185
十二、3-D 静磁分析 (MVP 方法) 的加载选项	186
十三、3-D 矢量静磁分析 (MVP 方法) 的另外一种求解方式	186
十四、电场 (电流传导) 分析的加载选项	186
十五、电场 (电流传导) 分析的载荷步选项	186
十六、静电场分析的加载选项	186
十七、静电场分析的载荷步选项	187

第一章 电磁场分析简介

在可独立应用的产品 ANSYS/Emag 或 ANSYS/Multiphysics 中, ANSYS 程序的电磁能力都可用于分析电磁场的多方面问题, 如电感、电容、阻抗、磁通量密度、磁场强度、磁通泄漏、涡流、电场分布、磁力线、品质因素、特征频率、磁力和力矩、运动效应、电路和能量损失等。这些可用于有效地分析下面所列的各项设备:

- 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
- 磁悬浮装置
- 磁带及磁盘驱动器
- 波导
- 谐振腔
- 开关
- 天线辐射
- 滤波器
- 等离子体装置
- 电解槽

等等。

用于 ANSYS 磁场分析的有限元公式由磁场的 Maxwell 方程组导出, 通过将标量势、矢量势或边界通量引入 Maxwell 方程组中并考虑其电磁性质关系, 就可开发出适合于有限元分析的方程组。

ANSYS 程序的其它一些功能增强了程序的电磁分析的能力和灵活性。例如, 用户可方便地选择 MKS、CGS 或其它一些单位制作为电磁场分析的单位制。作为标准的 Frontal 求解器的替代者, PCG、ICCG 和 JCG 迭代求解器非常适用于求解电磁场问题, 因为它们提供了势场问题的快速解法。使用二维和三维无限边界单元, 则不需要建立环绕电磁设备的无限介质(如空气)的大模型, 从而可以采用更小的模型, 同时降低了对计算机资源的需求。

ANSYS 程序提供了丰富的线性和非线性材料的表达方式, 包括各向同性或正交各向异性的线性磁导率, 材料的 B-H 曲线和永磁体的退磁曲线。后处理功能允许用户显示磁力线、磁通密度和磁场强度并进行力、力矩、源输入能量、感应系数、端电压和其它参数的计算。

ANSYS 程序的电场分析功能可用于研究电场三个方面的问题: 电流传导、静电分析和电路分析。感兴趣的典型物理量包括电流密度、电场强度、电势分布、电通量密度、传导产生的焦耳热、贮能、力、电容、电流以及电势降等。

使用通用 ANSYS 程序进行电磁场有限元分析的主要优点之一是耦合场分析功能。磁场分析的耦合场载荷可被自动耦合到结构、流体及热单元上。此外在对电路耦合器件的电磁场分析时, 电路可被直接耦合到导体或电源, 同时也计及运动的影响。

一、在电磁场分析中要计算的量

- 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
- 反射波损耗
- 特征频率

二、电磁场的来源

- 电流
- 外加磁场
- 永磁体

三、什么时候要用二维分析？

- 2-D 平面分析：
 - 忽略终端效应
 - 模型位于 X-Y 平面
 - 电流方向只沿 X-Y 面的法线方向（Z 方向）
 - 磁场只具有 X-Y 面内的分量
- 2-D 轴对称分析
 - 模型位于 X-Y 平面
 - 电流方向只沿 X-Y 面的法线方向（圆周 Z 方向）
 - 磁场只具有 X-Y 面内的分量

四、什么时候要用三维分析？

要计算的设备不具有对称性
电流不只沿着一个方向流动
可描述 2-D 分析无法实现的计算

五、自由度情况

有限元计算中的主自由度是磁势或磁通量，其他的磁场量都由这些主自由度给出。具体问题中的自由度可以是磁矢势、磁标势和磁通量，这要根据你所选择的单元类型和单元选项来选择。

六、ANSYS 程序中磁场分析的类型

- 2-D 静态磁场分析，分析直流电 (DC) 或永磁体所产生的磁场，用矢势法。
- 2-D 谐波磁场分析，分析低频交流电流 (AC) 或交流电压所产生的磁场，用矢势法。
- 2-D 瞬态磁场分析，分析随时间任意变化的电流或外场所产生的磁场，用矢势法。
- 3-D 静态磁场分析，分析直流电或永磁体所产生的磁场，用标势法。
- 3-D 静态磁场分析，分析直流电或永磁体所产生的磁场，用基于单元边的方法。
- 3-D 谐波磁场分析，分析低频交流电所产生的磁场，用基于单元边的方法。这种方法适用于大部分谐波磁场分析。
- 3-D 瞬态磁场分析，分析随时间任意变化的电流或外场所产生的磁场，用基于单元边的方法。这种方法适用于大部分瞬态磁场分析。
- 3-D 静态磁场分析，基于节点。用矢势法。
- 3-D 谐波磁场分析，基于节点。用矢势法。
- 3-D 瞬态磁场分析，基于节点。用矢势法。

七、什么是磁标势法？

对于大多数 3-D 静态分析我们推荐使用标势法。在这种方法中可将电流源按“基元”建模，而不是单元，这样电流源可以不是有限元的一部分，只是在相应位置考虑它们对磁场的贡献。它不受模型其他部分的限制，建立模型更容易。标势法具有如下特点：

- 可用砖型（六面体）、楔型、金字塔型、四面体型单元。
- 电流源用“基元”（原始实体）定义
- 可含永久磁体
- 允许线性和非线性导磁率

- 可用节点偶合和约束方程

此外，标量法电流源建模较方便。这是因为可以用简单单元（线圈，电流排等）在相应位置考虑对磁场的贡献。

八、什么是磁矢势(MVP)法?

矢势法是基于节点方法中的一种（标势法是另一种节点法），矢势法中的节点自由度要比标势法多：AX、AY 和 AZ，亦即 X、Y 和 Z 方向的磁矢量势。在载压或电路耦合分析中还可以引入另外三个自由度：电流(CURR)，电动势降(EMF)和电势(VOLT)。2-D 磁分析必须采用矢势法，此时主自由度只有 AZ。

在矢势法中，电流源（导电区域）要作为整个有限元模型的一部分。因为它的节点自由度更多，所以它的运算速度较慢。

矢势定义如下：

$$B = \nabla \times A$$

B 为磁通密度，A 为磁矢势。

A 有 AX、AY、AZ 三个分量。在 2-D 平面分析和轴对称分析中只有 AZ 不为零，ANSYS 在每个有限元节点上求解 AZ，然后再据此计算其它场量，如磁通密度(B)。

将矢势公式的两端进行对“S 面”的面积分有

$$\int_S B \cdot dS = \int_S (\nabla \times A) \cdot dS$$

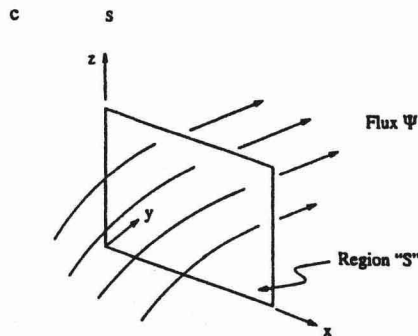
根据 Stokes's 定理有

$$\int_S (\nabla \times A) \cdot dS = \oint_C A \cdot dl$$

因此有

$$\oint_C A \cdot dl = \int_S B \cdot dS = \Psi(\text{flux})$$

利用界面单元 INTER115 就可以在同一个 3-D 模型内，同时采用标势法和矢势法来分析。



九、什么是基于单元边的分析?

基于单元边的方法只能用于 3-D 分析，而不能用于 2-D 分析，对大多数 3-D 谐波分析和瞬态分析都推荐使用这种方法。

基于单元边的方法中的自由度与单元边有关系，而与单元节点没关系。它提供了 3-D 低频静态和动态电磁场的求解能力。

这种方法同基于节点的矢势法相比计算更精确，特别是当模型中有铁区存在的时候。但在下列情况下要用矢势法：

- 当模型中存在着运动效应和电路耦合时；

- 当模型要求电路和速度效应时
- 当模型中的单元存在着楔形退化时;
- 当所分析的模型中没有铁区时。

十、高频电磁分析

ANSYS 程序具有高频电磁分析功能, 这种分析类型计算电磁场的传播特性和给定结构的波传播特性。

大多数高频设备都采用电磁波载带信息, 基于这种理由, 在这些设备设计中, 频率起着关键作用。当信息载波信号的波长与导波设备的大小相当时, 就应做高频分析。ANSYS 对“时间-谐波”和“模态高频”两种分析技术, 详见第 10 章。

十一、电磁场单元概述

ANSYS 有很多可用于模拟电磁现象的单元, 表 1-1 作了简单的介绍, 单元的详细描述请参见 ANSYS 单元手册。注意, 并非下表中的所有单元都能应用于所有的电磁分析类型, 详情请参阅相关分析类型章节的描述。

表 1-1 电磁分析单元

单元	维数	单元类型	节点数	形状	自由度和其它特征
PLANE53	2-D	磁实体矢量	8	四边形	AZ; AZ-VOLT; AZ-CURR; AZ-CURR-EMF
SOURC36	3-D	电流源	3	无	无自由度, 线圈、杆、弧型基元
SOLID96	3-D	磁实体标量	8	砖形	MAG
SOLID97	3-D	磁实体矢量	8	砖形	AX, AY, AZ, VOLT; AX, AY, AZ, CURR; AX, AY, AZ, CURR, EMF; AX, AY, AZ, CURR, VOLT; 速度效应和电路耦合
INTER115	3-D	界面	4	四边形	AX, AY, AZ, MAG
SOLID117	3-D	低频边界	20	砖形	AZ(边界); AZ(边界)-VOLT
HF119	3-D	高频边界	20	四面体	AX(边界)
HF120	3-D	高频边界	10	砖型	AX(边界)
CIRCU124	1-D	电路	8	线段	VOLT, CURR, EMF; 电阻、电容、电感、 电流源、电压源、绞线圈、2D 大线圈、 3D 大线圈、互感、控制源
PLANE121	2-D	静电实体	8	四边形	VOLT
SOLID122	3-D	静电实体	20	砖型	VOLT
SOLID123	3-D	静电实体	10	四面体	VOLT
INFIN9	2-D	无限边界	2	线段	AZ-TEMP
INFIN110	2-D	无限实体	8	四边形	AZ, VOLT, TEMP
INFIN47	3-D	无限边界	4	四边形	MAG, TEMP
INFIN111	3-D	无限实体	20	砖型	MAG, AX, AY, AZ, VOLT, TEMP
PLANE67	2-D	热电实体	4	四边形	TEMP-VOLT
LINK68	3-D	热电杆	2	线段	TEMP-VOLT
SOLID69	3-D	热电实体	8	砖型	TEMP-VOLT
SHELL157	3-D	热电壳	4	四边形	TEMP-VOLT
PLANE13	2-D	耦合实体	4	四边形	UX, UY, TEMP, AZ; UX-UY-VOLT
SOLID5	3-D	耦合实体	8	砖型	UX-UY-UZ-TEMP-VOLT-MAG; TEMP- VOLT-MAG; UX-UY-UZ; TEMP, VOLT/MAG
SOLID62	3-D	磁结构	8	砖型	UX-UY-UZ-AX-AY-AZ-VOLT
SOLID98	3-D	耦合实体	10	四面体	UX-UY-UZ-TEMP-VOLT-MAG; TEMP- VOLT-MAG; UX-UY-UZ; TEMP, VOLT/MAG

第二章 2-D 静态磁场分析

一、静态磁场的来源

- 直流电流
- 外加静磁场
- 外加电压
- 永磁体
- 运动导体

静磁分析不考虑随时间变化效应，如涡流等。它可以模拟各种饱和和磁性材料和永磁体。静磁分析的分析步骤根据以下几个因素决定：

- 模型是 2-D 还是 3-D
- 在分析中，希望使用哪种方法？如果静态分析为 2-D，就必须采用在本章内讨论的矢量势方法。对于 3-D 静态分析，你可选其中标量方法（第 5 章）、矢量势方法（第 9 章）、或者边界单元方法（第 6 章）。

二、二维静态磁场分析中要用到的单元：

2-D 模型要用二维单元来表示结构的几何形状。虽然所有的物体都是三维的，但在实际计算时首先要考虑是否能将它简化成 2-D 平面对称或轴对称问题，这是因为 2-D 模型建立起来更容易，运算起来也更快捷。

• 2-D 实体单元

PLANE13

维数：2-D

形状：四边形，4 节点或三角形，3 节点

自由度：每节点 4 个：磁矢势(AZ)、位移、温度或时间积分电势。



PLANE53

维数：2-D

形状：四边形，8 节点或三角形，6 节点

自由度：每节点 4 个，磁矢势(AZ)、时间积分电势、电流或电动势降。



• 远场单元

INFIN9

维数：2-D

形状：线型，2 节点

自由度：磁矢势(AZ)



INFIN110

维数：2-D

形状：四边形，4 个或 8 个节点

自由度：磁矢势(AZ)、电势、温度。



• 通用电路单元

CIRCU124

维数：无

形状：通用电路单元，合计达 6 节点

自由度：每个节点有三个：电势、电流或电动势降。

使用提示：常常与磁耦合。

2-D 单元用矢势法。因为单元是二维的，每个节点只有一个自由度：AZ(Z 方向上的矢势)。时间积分电势(VOLT)用于载流块导体或给导体加强制端条件。电流(CURR)是载压线圈中每匝中的电流值，便于给源线圈加电压载荷，它常用于载压线圈和电路耦合。当电压或电流载荷是通过一个外电路施加的时，就需要 CIRCU124 单元具有 AZ、CURR 和 EMF（电动势降或电势降）（关于电磁电路耦合的更详细信息请参见 ANSYS 耦合场分析指南）。

远场单元 INFIN9 的特点是:

- 易于使用
- 当模型边界处不需要很高精度时使用
- 当该单元位于圆形边界时计算最精确
- 仅对平面分析有效

远场单元 INFIN110 的特点是:

- 比 INFIN9 更精确
- 当模型边界处需要较高精度时使用
- 当该单元位于圆形边界时计算最精确
- 仅对平面分析和轴对称分析有效

更详细的信息请参见 Element Manual 手册。

三、静态磁场分析的步骤

静态磁场分析由五个主要步骤组成:

1. 创建物理环境
2. 建立模型, 划分网格, 赋予特性
3. 加边界条件和载荷 (激磁)
4. 求解
5. 后处理 (查看计算结果)

下面将详细讨论这几个步骤, 在本章末, 还有一个螺线管电磁铁的 2-D 静态分析例题。这个例题是以 ANSYS 图形用户界面的方式来做的, 并且还给出了相应的 ANSYS 命令格式。

步骤 1: 创建物理环境

步骤 1A: 设置 GUI 参考框

GUI: Main Menu>Preferences

在显示的对话框中, 从磁分析类型的列表中选择 Magnetic-Nodal 项。

步骤 1B: 定义分析标题

命令: /TITLE

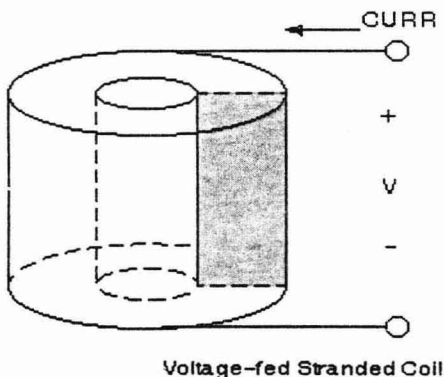
GUI: Utility Menu>File>Change Title

步骤 1C: 说明单元类型及其选项

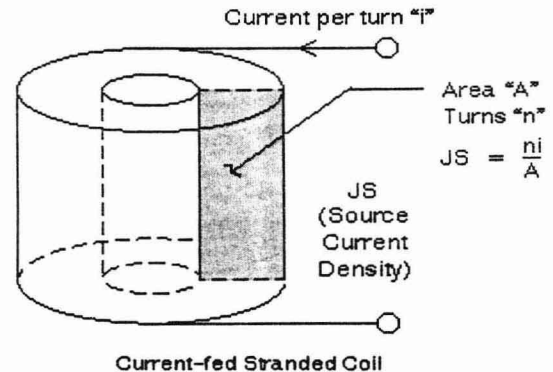
单元类型的选择要依赖于所处理问题的性质, 可以为模型中的不同的区域定义不同的单元类型。例如, 铁区用一种单元类型, 而绞线型线圈可能需要另一种单元类型。

命令: ET 或 KEYOPT

GUI: Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

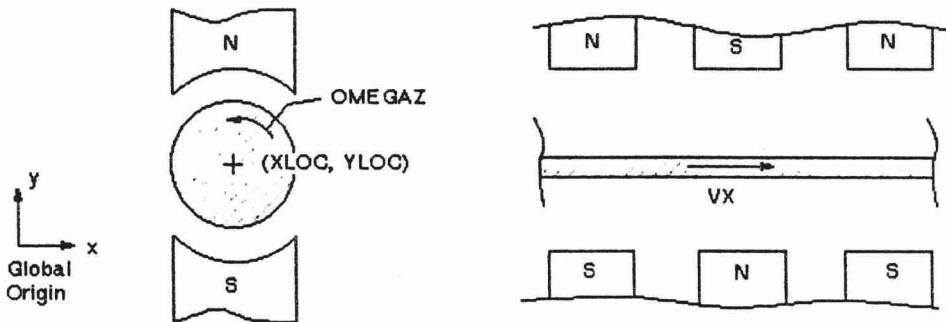


载压绞线圈



载流绞线圈

空气	DOF: AZ 材料特性: μ_r (MURX), ρ (RSVX) (如要计算焦耳热)
铁	DOF: AZ 材料特性: μ_r (MURX) 或 B-H 曲线 (TB 命令)
永磁体	DOF: AZ 材料特性: μ_r (MURX) 或 B-H 曲线 (TB 命令), H_c (矫顽力矢量 MGXX, MGY) 注: 永磁体的极化方向由矫顽力矢量和单元坐标系共同控制。
载流绞线圈	DOF: AZ 材料特性: μ_r (MURX) 特殊特性: 加源电流密度 JS (用 BFE, JS 命令) 注: 假定绞线型线圈内有不外界影响的 DC 电流。可以根据线圈匝数, 每匝中的电流和线圈横截面积来计算电流密度。
载压绞线圈	DOF: AZ, CURR 材料特性: μ_r (MURX), ρ (RSVX) 实常数: CARE, TURN, LENG, DIRZ, FILL 特殊特性: 加电压降 VLTG (用 BFE, JS 命令), 耦合 CURR 自由度。 注: 用单元 PLANE53 建模, 外加电压不受外界环境影响。
运动导体	DOF: AZ 材料特性: μ_r (MURX) 或 B-H 曲线 (TB 命令), ρ (RSVX) 实常数: VELOX, VELOY, OMEGAZ, XLOC, YLOC 注: 运动物体不允许在空间上有“材料”的改变。



实体转子感应电机

直线感应电机

以恒定速度运动的导体

利用 PLANE13 和 PLANE53 单元表示所有的内部区域, 包括铁区, 导电区, 永磁体区和空气等。

模拟一个平面向边界问题, 可采用 2 节点边界元 INFIN9 或 4/8 节点边界元 INFIN110。INFIN9 或 INFIN110 能模拟磁场的远场衰减, 而且相对于给定磁流平行或垂直边界条件而言, 远场单元可得到更好的计算结果。

大多数单元类型都有关键选项 (KEYOPTs), 这些选项用以修正单元特性。例如, 单元 PLANE53 有如下 KEYOPTs:

- KEYOPT (1) 选择单元自由度
- KEYOPT (2) 指定单元采用通用速度方程还是不计速度效应
- KEYOPT (3) 设定平面或轴对称选择
- KEYOPT (4) 设置单元坐标系类型
- KEYOPT (5) 说明单元结果打印输出选项
- KEYOPT (6) 保存磁力, 用以与有中间节点或无中间节点结构单元进行耦合

每种单元类型具有不同的 KEYOPT 设置，同一个 KEYOPT 对不同的单元含义也不一样。KEYOPT (1) 一般用于控制附加自由度的采用，这些附加自由度用来模拟电磁范围内不同的物理问题（例如，绞线导体、大导体、电路耦合导体等）。

设置单元关键选项的方式如下：

命令：ET 或 KEYOPT

GUI: Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/delete

步骤 1D: 定义单元坐标系

如果你的材料是分层的（迭片材料），或者永磁材料的极性是任意的，那么定义完单元类型及选项后，还需要说明单元坐标系（缺省为全局笛卡尔坐标系），这首先要定义一个局部坐标系（通过原点坐标及方向角来定义），方式如下：

命令：LOCAL

GUI: Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create
Local CS>At Specified Loc

局部坐标系可以是笛卡尔坐标系、柱坐标系（圆或椭圆）、球坐标系或环形坐标系。一旦定义了一种或多种局部坐标系，就需设置一个指针，确定即将定义的单元的坐标系，设置指针的方式如下：

命令：ESYS

GUI: Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Default Attribs
Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>Elem Attributes
Main Menu>Preprocessor>Operate>Extrude/Sweep

步骤 1E: 定义单元实常数和单位制

单元实常数和单元类型密切相关，用 R 族命令（如 R, RMODIF）或其相应菜单路径来说明。在电磁分析中，你可用实常数来定义绞线圈的几何形状、绕组特性以及描述速度效应等。当定义实常数时，要遵守如下二个规则：

1. 必须按次序输入实常数，详见 ANSYS 单元手册中的列表。
2. 对于多单元类型模型，每种单元采用独立的实常数组（即不同的 REAL 参数）。但是，一个单元类型可注明几个实常数组。

命令：R

GUI: Main Menu>Preprocessor>Real Constants

系统缺省的单位制是 MKS 制（米—安培—秒），你可以改变成你所习惯的一种新的单位制，但载压导体或电路耦合的导体必须使用 MKS 单位制。一旦选用了一种单位制，以后所有的输入均要按照这种单位制。

命令：EMUNIT

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Electromag Units

根据所选定的单位制，空气的导磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/M}$ （在 MKS 制中），或 $\mu_0 = \text{EMUNIT}$ 命令（或其等效的图形用户界面路径）定义的值。

步骤 1F: 定义材料特性

你的模型中可以有如下列一种或多种材料区域：空气（自由空间），导磁材料，导电区和永磁区。每种材料区都要输入相应的材料特性，材料特性可以是线性的，也可以是非线性的。

线性材料特性：

- 相对磁导率 (MURX, MURY, MURZ)
- 矫顽力 (MGXX, MGYY, MGZZ)，只用于永磁体
- 电阻 (RSVX, RSVY, RSVZ)，用于静态分析中的载压导体及用于计算载流导体的焦耳热
- 未作说明时，Y, Z 方向的分量缺省为 X 方向的分量
- 材料特性的方向是按照单元坐标系的
- 线性特性有时是常数，有时与温度有关
- 适用于低饱和区或非导磁材料

非线性（与场有关）材料特性：

- 用 B-H 曲线来表示非线性材料

- 用一条曲线表示, 不考虑磁滞效应
- 在各向异性的三个方向上可分别说明 B-H 曲线, ANSYS 缺省 B-H 曲线是各向同性的, 加在三个方向上。

ANSYS 程序材料库中有一些已定义好材料特性的材料, 你可以读出它们, 修改它们以适合你的使用。材料库文件的使用:

1. 如果你还没有定义好单位制, 用/UNITS 命令定义。

2. 定义材料库文件所在的路径。

命令: /MPLIB, read, pathdata

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Library>Library Path

3. 将材料库文件读入到数据库中。

命令: MPREAD, filename, ,, LIB

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Library>Import Library

4. 用 MP 命令或菜单 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Isotropic 编辑材料性质定义, 然后将改后的材料特性写回到材料库文件当中去。

命令: MPWRITE, filename, ,, LIB, MAT

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Library>Export Library

ANSYS 材料库中已定义好的材料 (只含线性性质) 有:

材料	材料性质文件
Copper (铜)	emag Copper. SI_MPL
M3 steel (钢)	emag M3. SI_MPL
M54 steel (钢)	emag M54. SI_MPL
SA1010 steel (钢)	emag Sa1010. SI_MPL
Carpenter steel (硅钢)	emag Silicon. SI_MPL
Iron Cobalt Vanadium steel (铁-钴-钒-钢)	emag Vanad. SI_MPL

该表中铜的材料性质定义有与温度有关的电阻率和相对导磁率, 所有其他材料的性质均定义为 B-H 曲线。对于列表材料, 在 ANSYS 材料库内定义的都是典型性质, 而且已外推到整个高饱和区。你的实际材料值可能与 ANSYS 材料库提供值有不同, 必要时可修正所用 ANSYS 材料库文件。

定义材料特性及实常数要注意的事项:

对空气:

说明相对磁导率为 1.0。

命令: MP, murx

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Isotropic

对导磁材料区:

说明 B-H 曲线, 可以从库中读出, 也可以自己输入。

命令: MPREAD, filename, ...

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Library>
Import Library

命令: TB, TBPT

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Data Tables>Define/Activate
Main Menu>Preprocessor>Material Props>Data Tables>Edit Active

输入 B-H 曲线必须要遵守的规则:

1. B 随 H 是单调递增的关系, 可画出 B-H 曲线图。

命令: TBPLOT

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Data Tables>Graph

2. B-H 曲线缺省通过圆心, 即 0.0 点不能输入。

3. ANSYS 程序根据 B-H 曲线自动计 $v-B^2$ 曲线, 它应该是光滑且连续的, 可用 TBPLOT 命令来验证。

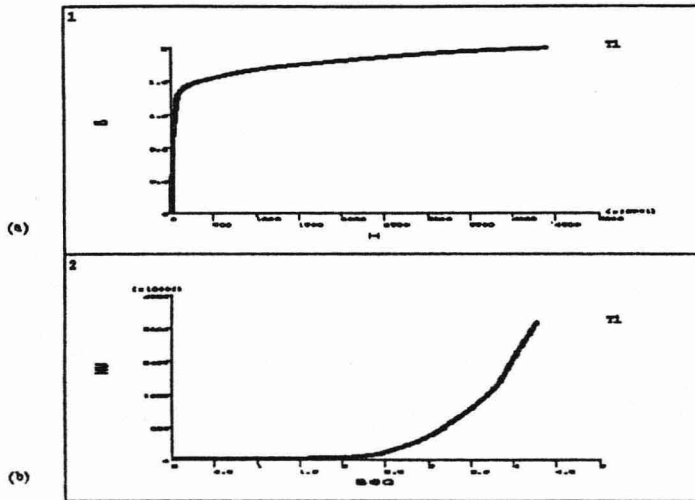


图 2-1 (a) B-H 曲线 (磁通量密度-磁场强度) (b) $v-B^2$ 曲线

4. B-H 曲线应覆盖材料的全部工作范围, 确保足够多的数据点以完整描述曲线. 如果需要超出 B-H 曲线的点, 程序按斜率不变自动进行外延处理, 你可以如下改变 X-轴的范围并用 TBPLT 命令画图来观察其外推情况.

命令: /XRANGE

GUI: Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs

5. 在曲线拐点处要用更多的数据点来描述.

6. 一般要将输入好的曲线数据放入材料库中, 以备以后使用.

如果材料是线性的, 那只需如下说明相对磁导率 μ_r .

命令: MP, murx

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Isotropic

如果对同一种材料既定义了非线性的 B-H 曲线, 又定义了相对磁导率, ANSYS 将只使用其相对磁导率!

各向异性材料的相对磁导率可用 MP 命令的 MURX、MURY、MURZ 域来分别进行定义, 联合使用 B-H 曲线和相对磁导率可定义正交各向异性材料的其中一个方向的非线性行为 (如叠片铁磁材料). 要在材料的某个方向上定义 B-H 曲线, 只需将该方向上的相对磁导率定义为零即可. 例如, 假设对材料 2 定义了 B-H 曲线, 而只希望该 B-H 曲线作用在材料的 Y 轴上, 而材料的 X 轴和 Z 轴都只定义相对磁导率 1000, 则可按如下步骤完成

```
mp, murx, 2, 1000
```

```
mp, mury, 2, 0          !读入 B-H 曲线
```

```
mp, murz, 2, 1000
```

对源导体区:

源导体即连有外部电流“发生器”(提供稳恒电流)的导体, 当你要计算焦耳热损耗时需说明它的电阻率, 电阻率可以是各向同性或正交各向异性.

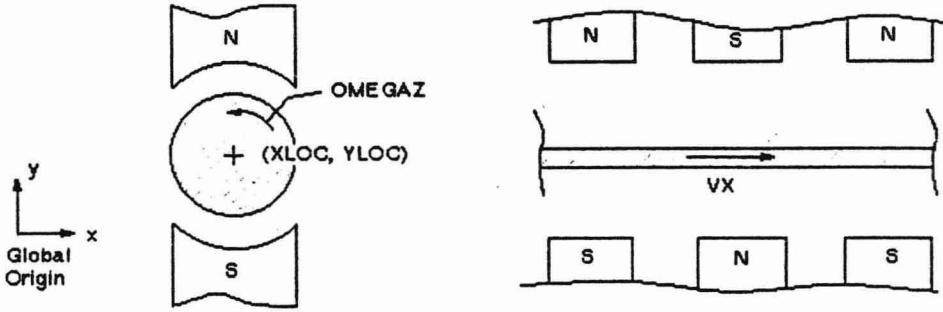
命令: MP, rsvx

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Isotropic

对运动导体区域:

对一个运动导体进行分析 (速度效应), 要规定各向同性电阻率 (以上所示方法). 可求解运动体在特定情况下的电磁场, 这些特定情况为: 运动体本身表现为一种均匀运动体, 亦即运动“材料”在空间保持不变, 如图 2-2 所示的两种情况:

- 第一种情况, 一个实体转子绕轴以一个不变速率旋转.
- 第二种情况, 一个“无限”长导体以不变的速度平移.



实体转子绕轴以不变速率旋转

“无限”长导体以不变的速度平移。

图 2-2 考虑速度效应的运动体示意图

诸如开槽转子以不变速度旋转等情形就不能考虑速度效应，因为这种情况下，电机中的“槽”就表示了旋转体在材料上不连续。另外，有限宽的平移导体在磁场中移动也不能考虑速度效应。典型的能考虑速度效应的例子是实体转子感应电机，线性感应机和涡流制动系统。

静态分析要求输入运动导体的平移速度或旋转速率，速度值和转动中心点坐标通过单元实常数来定义。速度效应通过单元关键选项来激活，而且只有 PLANE53 单元有此功能。

运动体分析的实常数有：

- VELOX, VELOY —— 在总体直角坐标系的 X 和 Y 方向上的速度分量。
- OMEGAZ —— 关于总体直角坐标系 Z 轴的角(旋转)速度(以周/秒(HZ) 表示)。
- XLOC, YLOC —— 转动中心点在总体直角坐标系上的 X、Y 坐标值。

运动体电磁分析问题的分析结果精度与网格的精细程度、磁导率、电导率和速度相关，这可用磁雷诺数 (Reynolds Number) 来表示：

$$M_{re} = \mu v d / \rho$$

式中 μ 为磁导率、 ρ 为电阻率、 v 为速度、 d 为导体有限元单元的特征长度 (沿运动方向)，磁雷诺数只在静态或瞬态分析中有意义。

运动方程只是在磁雷诺数相对小时才有效和精确，典型量级为 1.0，高雷诺数时精度随问题而变化。在后处理中可计算和获得磁雷诺数。除磁场解外，还可在后处理中得到由速度引起的电流，即速度电流密度 (JVZ)。

对永磁区：

需要说明永磁体的退磁 B-H 曲线和磁矫顽力矢量 (MGXX, MGYY 或 MGZZ)。退磁 B-H 曲线通常在第二象限，但需按第一象限输入，"偏移量" 为 H_c 。

$$H_c = \sqrt{(MGXX^2 + MGYY^2 + MGZZ^2)}$$

H_c 为矫顽力矢量的大小，矫顽力矢量常和单元坐标系一起定义永磁体的极化轴方向。

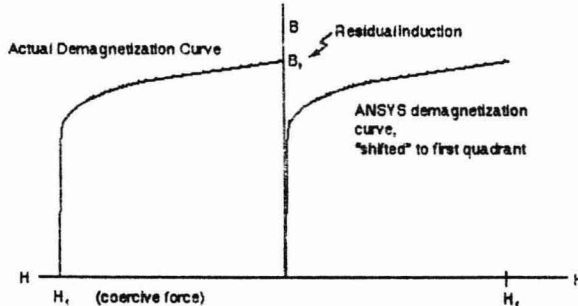


图 2-3 实际退磁曲线和 ANSYS 退磁曲线