

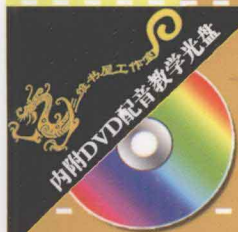


ANSYS工程应用系列

ANSYS 13.0

电磁学有限元分析 从入门到精通

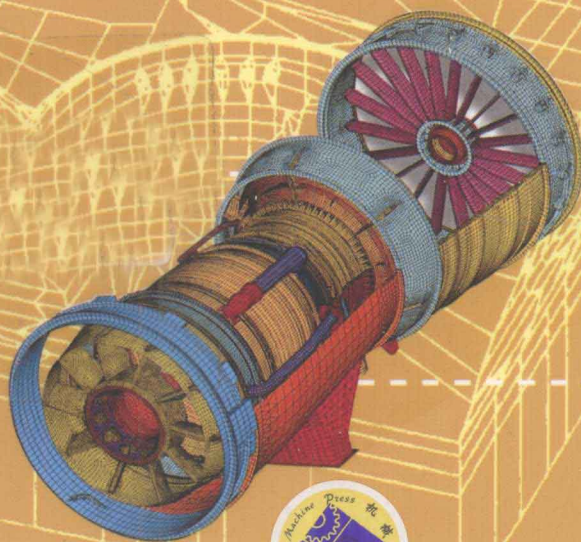
视频操作 ■ 源文件 ■ 最终效果



三维书屋工作室

胡仁喜 孙明礼 等编著

全面完整的知识体系
深入浅出的理论阐述
循序渐进的分析讲解
实用典型的实例引导



本丛书包含各书目分别由ANSYS工程应用领域的专家和学者执笔编写，书中溶入了他们多年研究的经验和体会，为了便于读者快速掌握ANSYS工程开发技巧，书中引用大量的工程案例。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ANSYS 13.0 电磁学有限元分析 从入门到精通

三维书屋工作室

胡仁喜 孙明礼 等编著



机械工业出版社

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS13.0 为平台, 讲述了目前工程中普遍面临的各类电磁场分析问题, 并通过丰富的实例详细介绍了如何利用 ANSYS 有限元软件求解电磁场分析问题。书中尽量避开了繁琐的理论描述, 从实际应用出发, 结合作者使用该软件的经验, 实例部分采用 GUI 方式一步一步地对操作过程和步骤进行了讲解。为了帮助用户熟悉 ANSYS 的相关操作命令, 在每个实例的后面列出了分析过程的命令流文件。

本书共分 13 章, 第 1 章对 ANSYS 电磁场有限元分析进行了简要叙述, 并介绍了后续章节常用的磁宏和远场单元内容; 第 2 章~第 4 章介绍了二维静态、谐波、瞬态磁场分析; 第 5 章~第 9 章分别使用标量法、棱边单元法和节点法对三维静态、谐波、瞬态磁场分析进行介绍; 第 10 章介绍了稳态电流传导分析; 第 11 章对静电场分析进行了介绍; 第 12 章介绍了电路分析的内容; 第 13 章介绍了高频电磁场分析的内容。

本书适合于各高校工科高年级本科和研究生作为自学教材, 也可以作为电磁学工程设计和研究人员的参考工具书。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 13.0 电磁学有限元分析从入门到精通/胡仁喜等编著.—2 版.
—北京: 机械工业出版社, 2011.12
ISBN 978-7-111-36676-8

I. ①A… II. ①胡… III. ①电磁场—有限元分析—应用程序,
ANSYS 13.0—高等学校—教材 IV. ①0441.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 250830 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 曲彩云 责任编辑: 曲彩云

责任印制: 杨 曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2012 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·27 印张·665 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-36676-8

ISBN 978-7-89433-235-6 (光盘)

定价: 59.00 元 (含 1DVD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑: (010)88379782

社服务中心: (010)88361066

网络服务

销售一部: (010)68326294

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

现代工业的典型特征是大量使用计算机,无论是产品的开发、设计,还是分析、制造过程中,计算机的应用都极大地提高了效率和质量。计算机辅助工程(CAE)就是其中必不可少的一个环节,它是计算机技术和现代工程方法的完美结合。

ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析(FEA)软件,它是世界范围内用户增长最快的 CAE 软件,能够进行包括结构、热、声、流体以及电磁场等学科的研究,在核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医药、轻工、地矿、水利、日用家电等领域有着广泛的应用。ANSYS 的功能强大,操作简单方便,现在它已成为国际最流行的有限元分析软件,在历年 FEA 评比中都名列第一。目前,中国 100 多所理工院校采用 ANSYS 软件进行有限元分析或者作为标准教学软件。

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS 13.0 为平台,讲述了目前工程中普遍面临的各类电磁场分析问题,并通过丰富的实例详细介绍了如何利用 ANSYS 有限元软件求解电磁场分析问题。书中尽量避免了繁琐的理论描述,从实际应用出发,结合作者使用该软件的经验,实例部分采用 GUI 方式一步一步地对操作过程和步骤进行了讲解。为了帮助用户熟悉 ANSYS 的相关操作命令,在每个实例的后面列出了分析过程的命令流文件。

本书共分 13 章,第 1 章对 ANSYS 电磁场有限元分析进行了简要叙述,并介绍了后续章节常用的磁宏和远场单元内容;第 2~4 章介绍了二维静态、谐波、瞬态磁场分析;第 5~9 章分别使用标量法、棱边单元法和节点法对三维静态、谐波、瞬态磁场分析进行介绍;第 10 章介绍了稳态电流传导分析;第 11 章使用 h 方法对静电场分析进行了介绍;第 12 章介绍了电路分析的内容;第 13 章介绍了高频电磁场分析的内容。

本书附有一张光盘,光盘中除了有每一个实例 GUI 实际操作步骤的视频以外,还以文本文件的格式给出了每个实例的命令流文件,用户可以直接调用。

本书主要介绍使用 ANSYS 软件进行电磁场分析的过程和步骤,文中所采用的参数和数据仅用于 ANSYS 分析过程的演示,对具体问题不一定适用。

本书由三维书屋工作室总策划,主要由浙江师范大学的孙明礼老师编写,胡仁喜、康士廷、刘昌丽、王义发、张俊生、王敏、周冰、董伟、李瑞、王兵学、袁涛、王渊峰、王玉秋、孟清华、王艳池、李广荣、王培合、郑长松、王佩楷、董荣荣、王宏、王玮、张日晶、王文平、阳平华等也参加了部分章节的编写工作。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免存在缺点和错误,恳请专家和广大读者不吝赐教,批评指正。也欢迎业内人士登录网站 sjzsanweishuwu.com 或联系 win760520@126.com 共同探讨。

编 者

目 录

前言

第1章 电磁场有限元分析概述	2
1.1 电磁场基本理论	2
1.1.1 麦克斯韦方程	2
1.1.2 一般形式的电磁场微分方程	3
1.1.3 电磁场中常见边界条件	3
1.2 ANSYS 电磁场分析对象	4
1.3 标量位、矢量位、棱边单元方法的比较	5
1.3.1 磁标量位方法	5
1.3.2 磁矢量位方法	5
1.3.3 棱边单元方法	5
1.4 电磁场单元概述	6
1.5 电磁宏	7
1.5.1 电磁宏使用范围	7
1.5.2 电磁宏分类	7
1.6 远场单元及远场单元的使用	14
1.6.1 远场单元	15
1.6.2 使用远场单元的注意事项	15
第2章 二维静态磁场分析	18
2.1 二维静态磁场分析中要用到的单元	19
2.2 静态磁场分析的步骤	19
2.2.1 创建物理环境	20
2.2.2 建模、指定特性、分网	28
2.2.3 施加边界条件和载荷	28
2.2.4 求解	31
2.2.5 后处理（查看计算结果）	33
2.3 实例1——二维螺线管制动器内静态磁场的分析	37
2.3.1 问题描述	37
2.3.2 GUI 操作方法	38
2.3.3 命令流实现	50
2.4 实例2——载流导体的电磁力分析	52
2.4.1 问题描述	52
2.4.2 GUI 操作方法	53
2.4.3 命令流实现	65
第3章 二维谐波磁场分析	68
3.1 二维谐波磁场分析中要用到的单元	69
3.2 二维谐波磁场分析的步骤	70

3.2.1 创建物理环境	70
3.2.2 建立模型, 赋予特性, 划分网格	74
3.2.3 加边界条件和励磁载荷	74
3.2.4 求解	76
3.2.5 观察结果	78
3.3 实例 1——二维自由空间线圈的谐波磁场的分析	81
3.3.1 问题描述	81
3.3.2 GUI 操作方法	81
3.3.3 命令流实现	93
3.4 实例 2——二维非线性谐波分析	96
3.4.1 问题描述	96
3.4.2 GUI 操作方法	96
3.4.3 命令流实现	105
第 4 章 二维瞬态磁场分析	108
4.1 二维瞬态磁场分析中要用到的单元	109
4.2 二维瞬态磁场分析的步骤	109
4.2.1 创建物理环境	109
4.2.2 建立模型、赋予属性、划分网格	109
4.2.3 施加边界条件和励磁载荷	109
4.2.4 求解	111
4.2.5 观察结果	114
4.3 实例 1——二维螺线管制动器内瞬态磁场的分析	117
4.3.1 问题描述	117
4.3.2 GUI 操作方法	118
4.3.3 命令流实现	132
4.4 实例 2——带缝导体瞬态分析	134
4.4.1 问题描述	134
4.4.2 GUI 操作方法	134
4.4.3 命令流实现	146
第 5 章 三维静态磁场分析 (标量法)	153
5.1 三维静态磁场标量法分析中要用到的单元	154
5.2 用标量法进行三维静态磁分析的步骤	155
5.2.1 创建物理环境	155
5.2.2 建立模型	156
5.2.3 施加边界条件和励磁载荷	158
5.2.4 求解	159
5.2.5 观察结果 (RSP,DSP 或 GSP 方法分析)	161
5.3 实例 1——三维螺线管静态磁分析	162
5.3.1 问题描述	162

5.3.2 GUI 操作方法	163
5.3.3 命令流实现	176
5.4 实例 2——带空气隙的永磁体	179
5.4.1 问题描述	179
5.4.2 GUI 操作方法	181
5.4.3 命令流实现	194
第 6 章 三维静态磁场分析 (棱边单元法)	197
6.1 单元边方法中用到的单元	198
6.2 用棱边单元方法进行静态分析的步骤	199
6.2.1 创建物理环境、建模分网、加边界条件和载荷	199
6.2.2 求解	200
6.2.3 后处理	200
6.3 实例——计算电机沟槽中的静态磁场分布	201
6.3.1 问题描述	201
6.3.2 GUI 操作方法	202
6.3.3 命令流实现	214
第 7 章 三维谐波磁场分析 (棱边单元法)	217
7.1 单元边方法中用到的单元	218
7.2 用棱边单元方法进行谐波磁场分析的步骤	219
7.2.1 创建物理环境、建模分网、加边界条件和载荷	219
7.2.2 求解	221
7.2.3 后处理	221
7.3 实例——棱边元法计算电动机沟槽中谐波磁场分布	224
7.3.1 问题描述	224
7.3.2 GUI 操作方法	225
7.3.3 命令流实现	234
第 8 章 三维瞬态磁场分析 (棱边单元法)	237
8.1 单元边方法中用到的单元	238
8.2 用棱边单元法进行三维瞬态磁场分析的步骤	238
8.2.1 创建物理环境、建模分网、加边界条件和载荷	238
8.2.2 求解	239
8.2.3 后处理	242
8.3 实例——棱边元法计算电动机沟槽中瞬态磁场分布	244
8.3.1 问题描述	244
8.3.2 GUI 操作方法	245
8.3.3 命令流实现	256
第 9 章 三维静态、谐波和瞬态磁场分 (节点法)	258
9.1 用节点法进行三维静态磁场分析	259
9.1.1 选择单元类型和定义实常数	259

9.1.2	定义分析类型	260
9.1.3	选择方程求解器	260
9.1.4	加载和求解	260
9.1.5	备份数据	261
9.1.6	求解	261
9.1.7	计算电感矩阵和磁链	262
9.1.8	后处理	262
9.2	节点法三维谐波磁场分析	263
9.2.1	建立三维谐波磁分析的物理环境	263
9.2.2	加载和求解	266
9.2.3	观察结果	266
9.3	节点法三维瞬态磁场分析	266
9.3.1	建立三维瞬态分析的物理环境	267
9.3.2	加载和求解	267
9.3.3	观察节点法三维瞬态分析的计算结果	267
9.4	标势法和矢势法联合使用	267
9.4.1	建立混合区域的模型	267
9.4.2	矢量域和标量域的界面	268
9.4.3	施加载荷、求解混合模型	269
9.4.4	观察结果	269
第 10 章	稳态电流传导分析	270
10.1	电场分析要用到的单元	271
10.2	稳态电流传导分析的步骤	273
10.2.1	建立模型	273
10.2.2	加载并求解	273
10.2.3	观看结果	274
10.3	实例 1——正方形电流环中的磁场	276
10.3.1	问题描述	276
10.3.2	GUI 操作方法	277
10.3.3	命令流实现	284
10.4	实例 2——三侧向测井仪器的电场分析	286
10.4.1	问题描述	286
10.4.2	命令流实现	289
第 11 章	静电场分析 (h 方法)	301
11.1	h 方法静电场分析中用到的单元	302
11.2	用 h 方法进行静电场分析的步骤	302
11.2.1	建模	302
11.2.2	加载和求解	303
11.2.3	观察结果	305

11.3	多导体系统求解电容	306
11.3.1	对地电容和集总电容	306
11.3.2	步骤	306
11.4	开放边界的 Trefftz 方法	309
11.4.1	概述	309
11.4.2	步骤	310
11.5	实例 1——屏蔽微带传输线的静电分析	312
11.5.1	问题描述	312
11.5.2	GUI 操作方法	313
11.5.3	命令流实现	324
11.6	实例 2——电容计算实例	325
11.6.1	问题描述	325
11.6.2	GUI 操作方法	325
11.6.3	命令流实现	336
11.7	实例 3——做一个开放边界模型的静电分析	337
11.7.1	问题描述	337
11.7.2	GUI 操作方法	338
11.7.3	命令流实现	348
第 12 章	电路分析	350
12.1	电路分析中要用到的单元	351
12.1.1	使用 CIRCU124 单元	351
12.1.2	使用 CIRCU125 单元	354
12.2	使用电路建模程序	354
12.2.1	建立电路	355
12.2.2	避免电路不合理	356
12.3	电路分析的步骤	357
12.3.1	静态电路分析	357
12.3.2	谐波电路分析	359
12.3.3	瞬态电路分析	360
12.4	实例 1——谐波电路分析	364
12.4.1	问题描述	364
12.4.2	GUI 操作方法	365
12.4.3	命令流实现	373
12.5	实例 2——瞬态电路分析	374
12.5.1	问题描述	375
12.5.2	GUI 操作方法	375
12.5.3	命令流实现	385
第 13 章	高频电磁场分析	387
13.1	高频分析中要用到的单元	388

13.2	高频电磁场谐波分析的步骤	388
13.2.1	建立物理环境	388
13.2.2	建立模型、定义材料特性、划分网格	389
13.2.3	求解高频谐波分析	391
13.2.4	查看结果	392
13.3	高频电磁场模态分析的步骤	394
13.4	实例 1——同轴波导的高频谐波分析	396
13.4.1	问题描述	396
13.4.2	GUI 操作方法	396
13.4.3	命令流实现	408
13.5	实例 2——腔体高频模态分析	409
13.5.1	问题描述	410
13.5.2	GUI 操作方法	410
13.5.3	命令流实现	418

第 1 章

电磁场有限元分析概述

首先将对电磁场的基本理论作简单介绍, 然后介绍 ANSYS 电磁场分析的对象和方法, 最后介绍了在以后章节中经常用到的电磁宏和远场单元内容。

学 习 要 点

- 电磁场基本理论
- ANSYS 电磁场分析对象
- 标量位、矢量位、棱边单元方法的比较
- 电磁场单元概述
- 电磁宏
- 远场单元及远场单元的使用

1.1 电磁场基本理论

1.1.1 麦克斯韦方程

电磁场理论由一套麦克斯韦方程组描述,分析和研究电磁场的出发点就是麦克斯韦方程组的研究,包括这个方面的求解与实验验证。麦克斯韦方程组实际上是由4个定律组成,分别是安培环路定律、法拉第电磁感应定律、高斯电通定律(简称高斯定律)和高斯磁通定律(亦称磁通连续性定律)。

1. 安培环路定律

无论介质和磁场强度 H 的分布如何,磁场中的磁场强度沿任何一条闭合路径的线积分等于穿过该积分路径所确定的曲面 Ω 的电流的总和。这里的电流包括传导电流(自由电荷产生)和位移电流(电场变化产生)。用积分表示为:

$$\int_{\Gamma} H dl = \iint_{\Omega} \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) dS \quad (1-1)$$

式中, J 为传导电流密度矢量 (A/m^2); $\partial D / \partial t$ 为位移电流密度; D 为电通密度 (C/m^2)。

2. 法拉第电磁感应定律

闭合回路中感应电动势与穿过此回路的磁通量随时间变化率成正比。用积分表示为:

$$\int_{\Gamma} E dl = - \iint_{\Omega} \left(J + \frac{\partial B}{\partial t} \right) dS \quad (1-2)$$

式中, E 为电场强度 (V/m); B 为磁感应强度 (T 或 Wb/m^2)。

3. 高斯电通定律

在电场中,不管电介质与电通密度矢量的分布如何,穿出任何一个闭合曲面的电通量等于这已闭合曲面所包围的电荷量,这里指出电通量也就是电通密度矢量对此闭合曲面的积分,用积分形式表示为:

$$\iint_s D dS = \iiint_v \rho dV \quad (1-3)$$

式中, ρ 为电荷体密度 (C/m^3); v 为闭合曲面 S 所围成的体积区域。

4. 高斯磁通定律

磁场中,不论磁介质与磁通密度矢量的分布如何,穿出任何一个闭合曲面的磁通量恒等于零,这里指出磁通量即为磁通量矢量对此闭合曲面的有向积分。用积分形式表示为

$$\iint_s B dS = 0 \quad (1-4)$$

式(1-1)~式(1-4)还分别有自己的微分形式,也就是微分形式的麦克斯韦方程组,它们分别对应式(1-5)~式(1-8)。

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1-5)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-8)$$

1.1.2 一般形式的电磁场微分方程

电磁场计算中,经常对上述这些偏微分进行简化,以便能够用分离变量法、格林函数法等解得电磁场的解析解,其解得形式为三角函数的指数形式以及一些用特殊函数(如贝塞尔函数、勒让得多项式等)表示的形式。但工程实践中,要精确得到问题的解析解,除了极个别情况,通常是很困难的。于是只能根据具体情况给定的边界条件和初始条件,用数值解法求其数值解,有限元法就是其中最为有效、应用最广的一种数值计算方法。

1. 矢量磁势和标量电势

对于电磁场的计算,为了使问题得到简化,通过定义两个量来把电场和磁场变量分离开来,分别形成一个独立的电场或磁场的偏微分方程,这样便有利于数值求解。这两个量一个是矢量磁势 A (亦称磁矢位),另一个是标量电势 ϕ ,它们的定义如下:

矢量磁势定义为:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1-9)$$

也就是说磁势的旋度等于磁通量得密度。而标量电势可定义为:

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (1-10)$$

2. 电磁场偏微分方程

按式(1-9)和式(1-10)定义的矢量磁势和标量电势能自动满足法拉第电磁感应定律和高斯磁通定律。然后再应用到安培环路定律和高斯电通定律中,经过推导,分别得到了磁场偏微分方程(1-11)和电场偏微分方程(1-12):

$$\nabla^2 A - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu J \quad (1-11)$$

$$\nabla^2 \phi - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1-12)$$

式中, μ 和 ε 分别为介质的磁导率和介电常数, ∇^2 为拉普拉斯算子:

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (1-13)$$

很显然式(1-11)和式(1-12)具有相同的形式,是彼此对称的,这意味着求解它们的方法相同。至此,可以对式(1-11)和式(1-12)进行数值求解,如采用有限元法,解得磁势和电势的场分布值,再经过转化(即后处理)可得到电磁场的各种物理量,如磁感应强度、储能。

1.1.3 电磁场中常见边界条件

电磁场问题实际求解过程中,有各种各样的边界条件,但归结起来可概括为 3 种:狄利克莱(Dirichlet)边界条件、诺依曼(Neumann)边界条件以及它们的组合。

狄利克莱边界条件表示为:

$$\phi|_r = g(\Gamma) \quad (1-14)$$

式中, Γ 为狄利克莱边界; $g(\Gamma)$ 是位置的函数, 可以为常数和零, 当为零时称此狄利克莱边界为其次边界条件, 如平行板电容器的一个极板电势可假定为零, 而另外一个假定为常数, 为零的边界条件即为奇次边界条件。

诺依曼边界条件可表示为:

$$\frac{\delta\phi}{\delta n}|_r + f(\Gamma)\phi|_r = h(\Gamma) \quad (1-15)$$

式中, Γ 为诺依曼边界; n 为边界 Γ 的外法线矢量; $f(\Gamma)$ 和 $h(\Gamma)$ 为一般函数(可为常数和零), 当为零时为奇次诺依曼条件。

实际上电磁场微分方程的求解中, 只有在边界条件和初始条件的限制时, 电磁场才有确定解。鉴于此, 我们通常称求解此类问题为边值问题和初值问题。

1.2 ANSYS 电磁场分析对象

ANSYS 以麦克斯韦方程组作为电磁场分析的出发点。有限元方法计算未知量(自由度)主要是磁位或通量, 其他关心的物理量可以由这些自由度导出。根据所选择的单元类型和单元选项的不同, ANSYS 计算的自由度可以是标量磁位、矢量磁位或边界通量。

ANSYS 利用 ANSYS / Emag 或 ANSYS / Multiphysics 模块中的电磁场分析功能, 如图 1-1 所示, 可分析计算下列设备中的电磁场:

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

在一般电磁场分析中关心的典型的物理量为:

- | | | |
|--------|------------|-----------|
| • 磁通密度 | • 能量损耗 | • 磁场强度 |
| • 磁漏 | • 磁力及磁矩 | • s -参数 |
| • 阻抗 | • 品质因子 Q | • 电感 |
| • 回波损耗 | • 涡流 | • 本征频率 |

利用 ANSYS 可完成下列电磁场分析:

二维静态磁场分析, 分析直流电(DC)或永磁体所产生的磁场。

二维谐波磁场分析, 分析低频交流电流(AC)或交流电压所产生的磁场。

二维瞬态磁场分析, 分析随时间任意变化的电流或外场所产生的磁场, 包含永磁体的效应。

三维静态磁场分析, 分析直流电或永磁体所产生的磁场。

三维谐波磁场分析, 分析低频交流电所产生的磁场。

三维瞬态磁场分析, 分析随时间任意变化的电流或外场所产生的磁场。

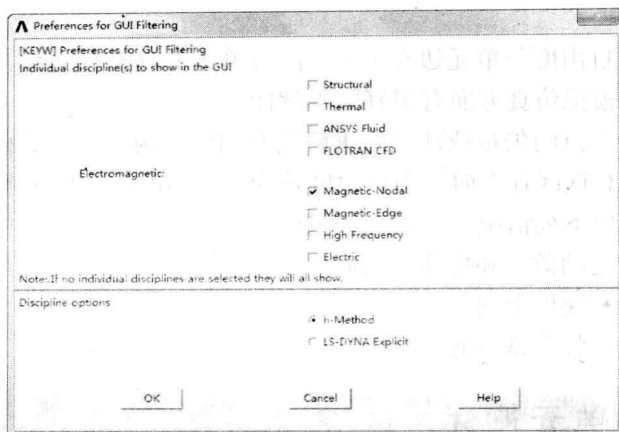


图 1-1 选择电磁场分析类型

1.3 标量位、矢量位、棱边单元方法的比较

1.3.1 磁标量位方法

磁标量位方法将电流源以基元的方式单独处理，无需为其建立模型和划分有限元网格。由于电流源不必成为有限元网格模型中的一部分，建立模型更容易，只需在合适的位置施加电流源基元（线圈型、杆型等）就可以模拟电流对磁场的贡献。对于大多数 3-D 静态分析请尽量使用标量位方法。

1.3.2 磁矢量位方法

矢量位方法（MVP）是 ANSYS 支持的两种基于节点的方法中的一种（标量位法是另一种基于节点的方法）。这两种方法都可用于求解三维静态、时谐、瞬态分析。

矢量位方法中每个节点的自由度要比标量位方法多，因为它在 X、Y 和 Z 方向分别具有磁矢量位 A_X 、 A_Y 、 A_Z 。在载压或电路耦合分析中还引入了另外 3 个自由度：电流（CURR），电压降（EMF）和电压（VOLT）。二维静态磁分析必须采用矢量位方法，此时主自由度只有 A_Z 。

在矢量位方法中，电流源（电流传导区域）要作为整个有限元模型的一部分。由于它的节点自由度更多，所以比标量位方法的运算速度要慢一些。

矢量位方法可应用于三维静态、时谐和瞬态的磁场分析计算。但是，当计算区域含有导磁材料时，该方法的精度会有损失（因为在不同导磁率材料的分界面上，由于矢量位的法向分量非常大，影响了计算结果的精度）。此时可以使用 INTER115 单元，在同一模型中同时使用三维标量位方法和三维矢量位方法。

1.3.3 棱边单元方法

在解决大多数的三维时谐问题和瞬态问题时推荐选用棱边单元法，但此方法对于二维

问题不适用。

棱边单元法中的自由度与单元边有关系，而与单元节点没有关系。此方法在三维低频静态和动态电磁场的模拟仿真方面有很好的求解能力。

这种方法和基于节点的矢量位法同时求解具有相同泛函表达式的模型时，此方法更精确，特别是当模型中有铁区存在时。当自由度是变化的情况下，棱边单元法比基于节点的矢量位方法更有效。但下列情况下只能用矢量位法：

- 模型中存在着运动效应和电路耦合时
- 模型要求电路和速度效应时
- 所分析的模型中没有铁区时

1.4 电磁场单元概述

ANSYS 提供了很多可用于模拟电磁现象的单元，表 1-1 作了简要介绍。

表 1-1 电磁场单元

单元	维数	单元类型	节点数	形状	自由度和其他特征
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	砖型	MAG (简化、差分、通用标势)
SOLID97	3-D	磁实体矢量	8	砖型	AX、AY、AZ、VOLT; AX、AY、AZ、CURR; AX、AY、AZ、CURR、EMF; AX、AY、AZ、CURR、VOLT; 支持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	低频棱边单元	20	砖型	AZ (棱边); AZ (棱边)-VOLT
HF119	3-D	高频棱边单元	10	四面体	AX (棱边)
HF120	3-D	高频棱边单元	20	砖型	AX (棱边)
CIRCU124	1-D	电路	8	线段	VOLT、CURR、EMF; 电阻、电容、电感、电流源、电压源、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
SOLID127	3-D	静电实体	10	四面体	VOLT
SOLID128	3-D	静电实体	20	砖型	VOLT
INFIN9	2-D	无限边界	2	线段	AZ-TEMP
INFIN10	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

1.5 电磁宏

1.5.1 电磁宏使用范围

电磁宏是 ANSYS 宏命令，其功能是帮助用户方便地建立分析模型、求解及获取想要观察的分析结果。表 1-2 列出了 ANSYS 提供的电磁宏命令和功能，可用于电磁场分析。

表 1-2 电磁宏功能

电磁宏	功能
CMATRIX	计算导体间自有和共有电容系
CURR2D	计算二维导电体内电流
EMAGERR	计算在静电或电磁场分析中的相对误差
EMF	沿预定路径计算电动势 (emf) 或电压降
FLUXV	计算通过闭合同路的通量
FMAGBC	对一个单元组件加力边界条件
FMAGSUM	对单元组件进行电磁力求和计算
FOR2D	计算一个体上的磁力
HFSWEEP	在一个频率范围内对高频电磁波导进行时谐响应分析，并进行相应的后处理计算
HMAGSOLV	定义 2-D 谐波电磁求解选项并进行谐波求解
IMPD	计算同轴电磁设备在一个特定参考面上的阻抗
LMATRIX	计算任意一组导体间的电感矩阵
MAGSOLV	对静态分析定义磁分析选项并开始求解
MMF	沿一条路径计算磁动力
PERBC2D	对 2-D 平面分析施加周期性约束
PLF2D	生成等势的等值线图
PMGTRAN	对瞬态分析的电磁结果求和
POWERH	在导体内计算均方根 (RMS) 能量损失
QFACT	根据高频模态分析结果，计算高频电磁谐振器件的品质因子
RACE	定义一个“跑道形”电流源
REFLCOEF	计算同轴电磁设备的电压反射系数、驻波比和回波损失
SENERGY	计算单元中储存的磁能或共能
SPARM	计算同轴波导或 TE ₁₀ 模式矩形波导两个端口间的反射参数
TORQ2D	计算在磁场中物体上的力矩
TORQSUM	对 2-D 平面问题中单元部件上的 Maxwell 力矩和虚功力矩求和

1.5.2 电磁宏分类

电磁宏根据实现的功能，可以分为下列 4 类：