

基于 An soft Maxwell 3D 的电磁场分析与计算

陈 红

(安徽国防科技职业学院 机电工程系, 安徽 六安 237011)

摘要: 电磁场分析是复杂电子电气产品设计的一个重要环节, 是决定产品性能的关键因素; 而电磁场的有限元分析方法作为一个强大的工具, 在工程中的应用极为广泛. 根据长直螺线管的电磁场数学推导结果, 利用 ANSYS 工程电磁场有限元软件对其进行仿真, 验证了结果的一致性, 反映出有限元方法在电磁场分析的优势及 ANSYS 软件分析的直观性与便利性, 展示了 ANSYS 软件在电磁场分析应用中的基本方法与技巧. 实验证明, An soft Maxwell 3D 在分析复杂电磁场方面具有很高的实用价值.

关键词: 电磁场; 有限元求解; An soft Maxwell 3D; 对比分析

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2012) 04-0107-04

随着社会的发展, 电子电气产品已广泛应用于工业、农业、医疗、气象、军事等各个领域. 产品的微型化、智能化使得元件的密度大幅增加, 连接日益复杂, 电磁问题因此成为决定产品质量和可靠性的一个关键因素而成为研究的热点. 而对于产品性能的可靠性分析, 由最初的经验预估、理论计算, 发展到了如今的计算机仿真. 产品的设计正朝着利用计算机实现虚拟设计、虚拟实验的方向发展^[1].

性能相对简单、测试成本较低电子电气产品可以通过原型或者简化实验完成性能评估. 但是对于具有复杂性能和复杂结构的电子电气产品而言, 往往需要昂贵的测试设备, 较长的实验周期, 并对周围的测试环境有较强的依赖性. 因此, 在这样条件下要完成某种产品在多种状态的性能评估, 需要较高成本, 并且难以满足一致性标准. 这些使得计算机仿真对产品设计的指导意义愈加明显, 因此 Maxwell 应运而生.

Maxwell 是 An soft 公司的一个功能强大、结果精确、易于使用的二维/三维电磁场有限元分析软件. 其功能包括静电场、静磁场、时变磁场、涡流场、瞬态场和温度场计算等, 可用来分析电机、

传感器、变压器、永磁设备、激励器等电磁装置的静态、稳态、瞬态、正常工作和故障工作的情况; 此外还包括三维电磁分析、三维直流磁场分析、涡流分析和瞬态场分析. ANSYS 充分利用了各种电磁计算方法的优点, 发展了多个适用于不同领域的电磁分析模块, 这些模块优势互补、在统一的软件界面下共同解决各种复杂的电磁分析问题^[2].

1 电磁场的分析方法

1.1 基本理论

电磁场理论的基础主要是麦克斯韦方程组, 它有积分和微分两种表达形式, 以下是以自由电荷和自由电流为源头所表述的微分形式^[3]:

$$\text{电磁感应定律: } \nabla \cdot E = -\partial B / \partial t, \quad (1)$$

$$\text{全电流定律: } \nabla \cdot H = J + \partial D / \partial t, \quad (2)$$

$$\text{高斯定律: } \nabla \cdot D = \rho, \quad (3)$$

$$\text{磁通连续定律: } \nabla \cdot B = 0. \quad (4)$$

该方程组和其他的基本定律是解决电磁问题的理论基石, 为电磁装置在各个领域的广泛应用开辟了广阔的空间.

1.2 有限元分析的意义

不同形式的电磁场特性各异, 在具体分析的

过程中应采用不同的方法(图 1)^[4].

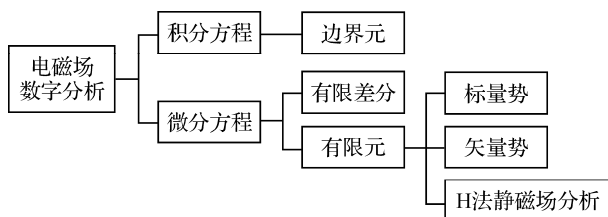


图 1 电磁场分析结构

从图 1 可以看出,电磁场的数值分析方法主要有微分和积分方法,微分法又包括有限差分和有限元两种分析方法,而差分法不适合于边界条件复杂、边界不规则(外部或内部)的情况。有限元的分析方法借助 ANSYS 软件对电磁场进行可视化分析,特别适合几何或物理条件比较复杂的问题,并能求解多耦合场问题的仿真,具有广泛的适用性。通过对比求解电磁场问题的不同手段,得出有限元方法在电磁场分析的优势。

1.3 有限元分析过程

有限元分析是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域组成,对每个单元假定 1 个合适的近似解,然后推导求解这个域总的满足条件,从而得到问题的解。最后的解虽然不是准确解,但由于大多数实际问题难以得到准确解,而利用有限元的计算能得到较为精确的近似解,且能适应各种复杂形状,因而成为行之有效的工程分析手段^[2]。

ANSYS 分析过程中的主要步骤为:(1)创建有限元模型,主要包括创建或读入几何模型、定义材料属性和划分单元(节点及单元);(2)施加载荷进行求解,包括施加载荷及载荷选项和求解;(3)查看结果及求解结果后的处理,即查看分析结果及检验结果。

2 An soft Maxwell 3D 的电磁场分析与计算

以有限长螺线管的电磁场分析与计算为例,对如何利用 An soft Maxwell 3D 进行电磁场分析与计算进行较深入的分析和研究,从而得到有限长螺线管的电磁场分布规律及利用 An soft Maxwell 3D 进行电磁场分析的基本思想。

2.1 有限长载流直螺线管解析计算

对于有限长载流直螺线管的电磁场,当绕制

螺线管的导线很细时,密绕的圆柱形螺线管可以认为是许多圆形电流组合而成。圆电流的磁感应强度分布有多种求解方案,其中比较有代表性的方法是先求圆电流的矢势 A ,然后由 $B = \nabla \times A$ 计算其磁场分布^[5],此方法中通常将圆电流的磁矢势展开为级数。为求解其在空间任意一点的磁场,先求解一环形电流在空间任意一点的磁场,再利用迭加原理便可以得到长直螺线管的磁场分布。

2.1.1 一匝圆电流在空间任一点的磁场

通过分析计算,得到一匝电流在空间任一点的磁场分布为^[3]:

$$\vec{B} = -\frac{3\mu IR^2 \rho Z}{4(R^2 + Z^2 + \rho^2)^{5/2}} \vec{\rho}_0 + \frac{\mu IR^2 (2R^2 + 2Z^2 - \rho^2)}{4(R^2 + Z^2 + \rho^2)^{5/2}} \vec{Z}_0. \quad (5)$$

2.1.2 有限长载流直螺线管的磁场分布

有限长载流螺线管等效原理如图 2 所示^[6]。利用(5)式的计算结果,将一匝电流在空间产生的磁场进行叠加,最后得长直螺线管外部任一点的磁场为:

$$\vec{B} = \frac{\mu n I R^4}{2(R^2 + \rho^2)^2} \vec{Z}_0. \quad (6)$$

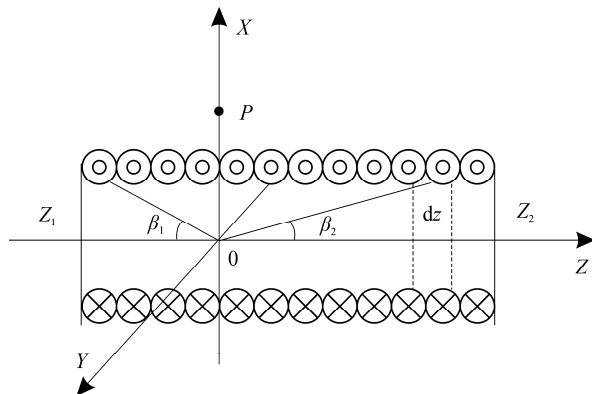


图 2 N 匝螺线管示意图

2.2 长直螺线管的数值计算^[7-8]

首先生成螺线管的几何模型。螺线管是由线圈和铁心组成的,可以用 1 个空心圆柱体来模拟,实际上表示绕着中央铁心的多匝绞线。然后指定材料属性,这里选择的铁心是 steel_1008;选择自然边界条件和施加的源是 source = 8 000 mA;再设定执行参数,指定求解规范,选择自适应网格划分。计算结果如图 3~图 7 所示。

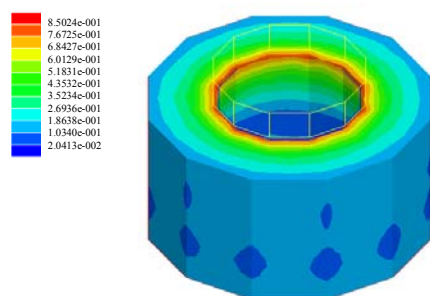


图 3 表面电磁场密度 B 分布

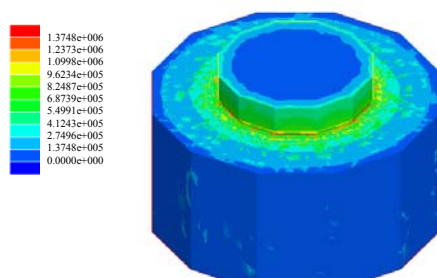


图 4 表面磁场强度 H 分布

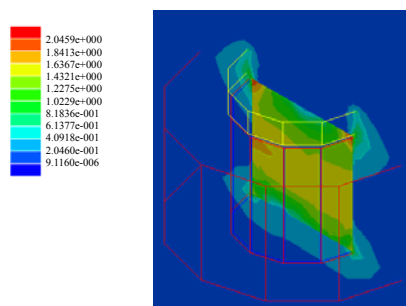


图 5 磁通密度分布

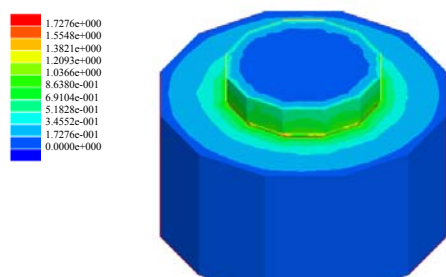


图 6 B 空间的分布

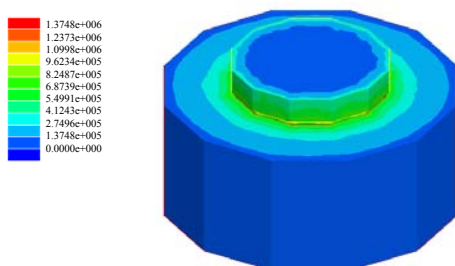


图 7 H 空间的分布

2.3 误差分析

如图 5 所示, 选定圆柱体表面原点 0, 在解析计算中把相关的参数带入 $\vec{B} = \mu n I R^4 \vec{Z}_0 / (R^2 + \rho^2)^2$ 式, 得到如下数据:

$$B = \frac{5 \times 2105 \times 10^{-5}}{2 \times 1100 \times 1237 \times 10^{-3}} = 1.295 \times 10^{-5} \text{ wb} \cdot \text{m}^{-2},$$

可以直接看出 0 点处的 B 介于 $1.7 \times 10^{-5} \sim 2.3 \times 10^{-5} \text{ wb} \cdot \text{m}^{-2}$.

其产生误差的原因如下:

- (1) 网格划分采用的是自适应网格划分, 没有划分更细的网格, 可以看到 1% 左右的计算不收敛.
- (2) 忽略了螺线管匝间的空隙, 将螺线管看成了一个整体, 当成一个圆柱体进行计算^[8].

可见, 有限长密绕椭圆截面螺线管内磁场是非均匀磁场, 而螺线管中部的磁场是匀强磁场, 磁场最强; 螺线管长短轴相差越大、螺线管越短, 磁场沿垂直螺线管轴向的分量越大. 反之, 当螺线管截面是圆截面并且螺线管较长时, 其内部匀强磁场区域越大, 磁场最强.

2.4 非线性媒质并与简单媒质比较

通过 An soft Maxwell 3D 对非线性材料的选择计算, 结果如图 8 和图 9 所示.

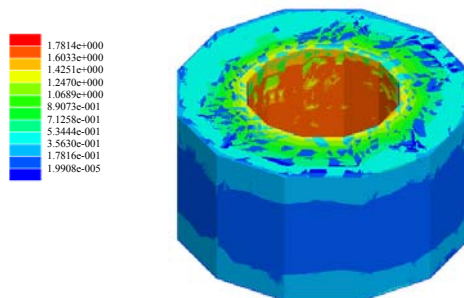


图 8 非线性材料 B 分布

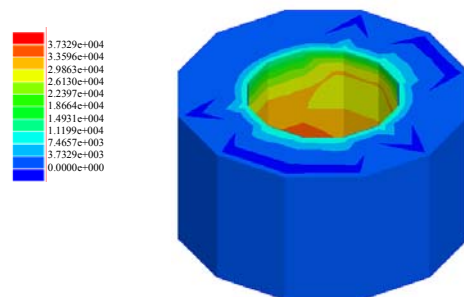


图 9 非线性材料 H 分布

从图中可以直观地看出, 与线性均匀媒质比较, 非线性媒质下的螺线管出现不规则、不均匀的

磁场强度和磁通密度的分布, 和解析分析结果是一致的.

3 结语

随着电磁元件更加广泛的应用和设计者对性能与体积设计封装的希望, 先进而便于使用的数字场仿真技术的需求也显著增长. An soft Maxwell 3D 以向导式的用户界面、精度驱动的自适应剖分技术和强大的后处理能力, 成为业界最佳的高性能三维电磁设计分析软件. 通过长直螺旋管的电磁场分析计算, 对深入理解和熟练运用其在工程实际和教学科研中的应用具有很重要的现实意义.

参考文献:

[1] 谢龙汗, 耿玉, 邱婉. ANSYS 电磁场分析[M]. 北京:

电子工业出版社, 2012:1-2.

- [2] 薛文惠, 李刚炎. 基于 Maxwell 3D 的汽车电磁缓速器瞬态电磁场有限元分析与仿真[J]. 机械工程师, 2007(10):31-32.
- [3] 马海武, 王丽黎, 赵仙红. 电磁场理论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005:112-113.
- [4] 张德春, 柳建, 王世庆, 等. ANSYS 软件在高频电磁场上的应用[J]. 真空, 2010(3):52-53.
- [5] 徐劳立. 计算圆电流磁场的一个方法[J]. 大学物理, 2012(2):19-20.
- [6] 余仕成, 周金华. 载流长直螺线管和螺绕环的磁场对称性分析[J]. 武汉工程大学学报, 2010(5):107-108.
- [7] 陈精一, 蔡国忠. 电脑辅助工程分析: ANSYS 使用指南[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001:7-11.
- [8] 陈红. 长直螺线管的电磁场分析[J]. 郑州轻工业学院学报, 2012(5):34-35.

Analysis on Electromagnetic Field Based on An Soft Maxwell 3D

CHEN Hong

(Department of Electrical and Mechanical Engineering, Anhui Vocational College of Defense Technology, Liu'an 237011, China)

Abstract: Electromagnetic field analysis is important in design of complex electrical and electronic products, it is also the key factor critical to the product performance. As a powerful tool, the electromagnetic field finite element analysis has been extensively applied in numerous engineering fields. In this paper, based on the computational results of the long straight solenoid electromagnetic, a simulation is taken using the engineering software ANSYS designed for electromagnetic field finite element computation, the results of which are found consistent with real consequences. This study reflects the advantage of applying the finite element method in electromagnetic field analysis and the intuitiveness and convenience of ANSYS. Practical applications have proved that An soft Maxwell 3D has high practical value in studying the complex electromagnetic fields.

Key words: electromagnetic field; finite element method; An soft Maxwell 3D; comparative analysis

(责任编辑 章践立)