

# 基于COMSOL Multiphysics的静磁场仿真与分析

方正

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年1月17日; 录用日期: 2025年2月10日; 发布日期: 2025年2月18日

## 摘要

本文采用COMSOL软件模拟了一个半径为5毫米的圆柱形微型永磁体的磁场分布, 并通过切片视图和体积箭头图示, 对磁铁周边的磁场进行了全方位的三维可视化分析。同时, 利用一维绘图集合深入探讨了磁铁边缘平行路径上各点的磁场特性。该仿真方法使得我们能够精确计算出磁铁周围特定路径或任意点的磁场强度, 不仅提升了磁场理解的直观性和形象性, 也为大学物理实验的教学提供了有力的辅助工具。

## 关键词

COMSOL, 静磁场, 仿真, 磁通密度, 磁场

# Simulation and Analysis of Static Magnetic Fields Based on COMSOL Multiphysics

Zheng Fang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 17<sup>th</sup>, 2025; accepted: Feb. 10<sup>th</sup>, 2025; published: Feb. 18<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This paper employs COMSOL software to simulate the magnetic field distribution of a cylindrical micro-permanent magnet with a radius of 5 millimeters. Through the use of slice views and volume arrow diagrams, a comprehensive three-dimensional visualization analysis of the magnetic field surrounding the magnet is conducted. Additionally, a one-dimensional plotting set is utilized to delve into the magnetic field characteristics of points along parallel paths at the edge of the magnet. This simulation method enables us to accurately calculate the magnetic field intensity at specific paths or arbitrary points surrounding the magnet, not only enhancing the intuition and imagery of

magnetic field understanding but also providing a powerful auxiliary tool for teaching in university physics experiments.

## Keywords

COMSOL, Static Magnetic Field, Simulation, Magnetic Flux Density, Magnetic Field

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在进行一些理化实验教学中，静磁场是大学物理实验教学中的一个重要组成部分。但是现有的实验分析中大多只存在浅显的公式和基本的磁场分布图形，这就致使了学生难以直观理解静磁场的实际分布情况。静磁场仿真是研究静止磁场的数值建模和计算的重要分支，广泛应用于电机设计、磁体设计、磁探测以及医学成像等领域。近年来，随着计算能力的提升和数值方法的进步，静磁场仿真的研究在诸多方面取得了重要进展。例如实现 MFS 软件对通电线圈静磁场以及永磁系统和通电线圈耦合磁场的仿真求解功能[1]；利用有限元软件对不对称接线变压器进行有限元分析，进行三维静磁场仿真，将电磁仿真结果与电磁计算结果进行比较，验证变压器电磁设计的正确性[2]；通过 Ansoft 3D 对无刷旋转变压器进行静磁场和瞬态场仿真，分析环形变压器对旋转变压器的影响[3]；以及基于直流螺线管式本质安全型电磁铁为研究对象，利用 Ansoft maxwell2D/3D 软件对电磁铁进行静磁场、温度场和暂态性能分析[4]。在众多有限元分析工具中，COMSOL Multiphysics 以其多物理场耦合计算功能的长处，被广泛应用于各类场景的仿真分析中，COMSOL 的动网格功能，可以精确、快速求解电磁轨道炮电磁特性[5]；还可利用 COMSOL 多物理场耦合的有限元方法，揭示粘接结构内部超声检测信号传播规律[6]。鉴于目前利用 COMSOL 软件进行磁场分析的相关研究较为有限，本文基于 COMSOL 软件，对微小磁铁周围的磁场分布进行分析，以帮助更直观地理解磁铁周围的磁场特性。

## 2. 小磁铁网格划分及仿真分析

打开 COMSOL Multiphysic AC/DC 板块中的“磁场，无电流”模块，可以对永磁体周围的磁场分布进行求解。首先需要进行外部环境的设置，此处设定  $T = 293.15 \text{ K}$  的室温与绝对压力 1 个大气压的标准大气压环境。求解方法使用标量磁势法，以应对静磁场中没有电流的情况。在计算磁体的磁场分布上，运用公式  $H = -\nabla V_M$  和  $\nabla \cdot B = 0$  获得结果。

### 2.1. 永磁体磁珠的建模及网格划分

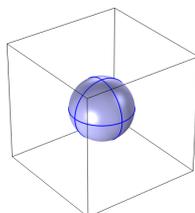


Figure 1. Spherical permanent magnet and its surrounding air environment  
图 1. 球形永磁体及所处的空气环境

根据材料参数属性，如图 1 所示：一个微小的球形永磁铁，其半径尺寸为 5 毫米，被包裹在一个边长为 20 毫米的立方体空气域中。该磁铁采用钕铁硼材料制成，其相对磁导率略高于普通物质，为 1.05，而空气的相对磁导率则为标准的 1。钕铁硼作为一种强磁性材料，其剩余磁通密度高达 1.45 特斯拉，且其极化方向指向 X 轴正方向。

网格划分尺寸为 10 μm 的单元，完成之后稳态求解，利用 COMSOL Multiphysics 后处理模块，对磁铁周围进行三维和一维截线的绘制，可以更直观地观测到磁铁周围磁场分布。图 2 为球形磁珠和空气环境进行网格划分后的示意图。

磁体的剩余磁通密度公式为：

$$B = \mu_0 \mu_{rec} H + B_r \tag{1}$$

$$B_r = \|B_r\| \frac{e}{\|e\|} \tag{2}$$

其中， $B_r$  为磁通密度模； $B$  为磁通密度； $\mu_{rec}$  为回复磁导率； $H$  为磁场强度； $e$  为单位向量。

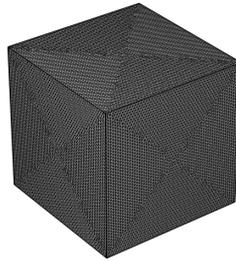


Figure 2. Schematic diagram of mesh generation for a spherical permanent magnet and its surrounding air environment  
图 2. 球形永磁铁及空气环境网格划分示意图

### 2.2. 永磁铁周围磁场切面分析

对于半径为 5 mm 的球形微小永磁铁，其周围磁场较难通过实验手段进行精确测量。借助 COMSOL 软件，利用 COMSOL 软件中的后处理模块，绘制出磁铁周围的三维绘图组和一维绘图组，本文分别从三维和一维角度直观展示微小磁铁周围的磁场分布与磁场力。

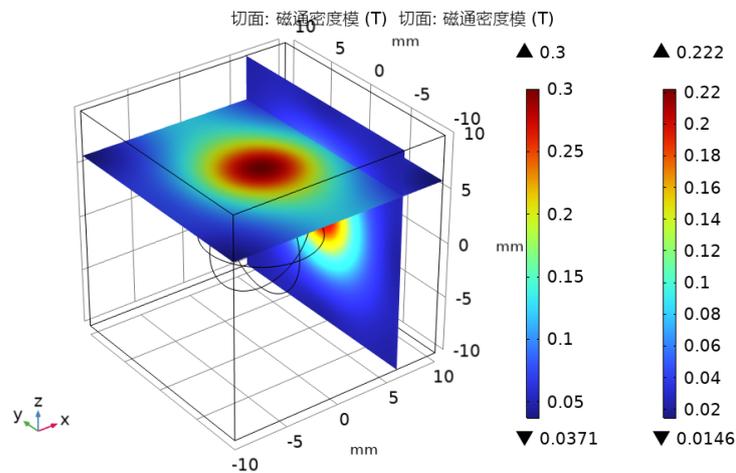


Figure 3. Slice plot of the magnetic field around a permanent magnet  
图 3. 永磁体周围磁场的切片图

图 3 展示了磁铁周边磁场分布的三维绘图组中的特定切片视图。其中，水平切片取自距离磁铁顶端 0.5 毫米处的 XY 平面，清晰显示磁铁凸起中心及其邻近区域磁通密度最高，磁场强度最大，随后向外逐渐递减。此平面上的磁通密度峰值达到 0.273 特斯拉，而最低值为 0.0153 特斯拉。另一方面，竖直切片则取自距磁铁 0.5 毫米的 YZ 平面，其磁场分布情况与 XY 平面相似，同样在磁铁凸起中心附近磁场最强，随着距离中心点的增加，磁场逐渐减弱。该平面上的磁通密度最大值达到 0.404 特斯拉，最小值则为 0.0423 特斯拉。值得注意的是，XY 与 YZ 切面的具体位置可根据需要灵活设定，用户不仅能查看空气域内任意点的切面图，还能同时观察多个平行或交叉的切面图，以获得更全面的磁场分布信息。

图 4 以体箭头图的形式展示了永磁体周边磁场的分布情况。箭头的密集程度和颜色深浅直观地反映了磁通密度的高低，而箭头的指向则揭示了磁场的方向。从图中可见，磁力线起始于 +X 轴方向，环绕磁铁一周后在 -X 轴方向终止，这一规律与理论预期相吻合。进一步观察发现，磁场强度最高的区域集中在磁力线密集分布的部位，特别是磁铁两侧的圆形凸起及其轴向环绕区域。此外，在磁铁的极化方向上，右侧表面的磁场强度相较于左侧更为显著，且随着距离磁铁的增大，磁场强度逐渐降低。

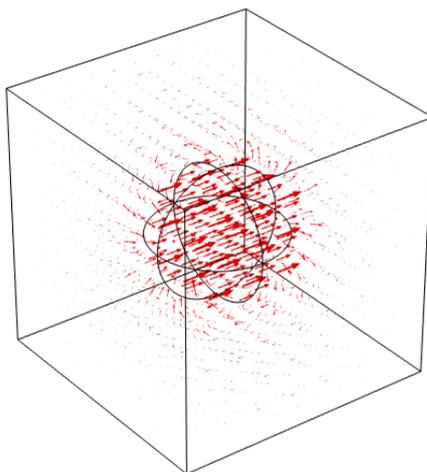
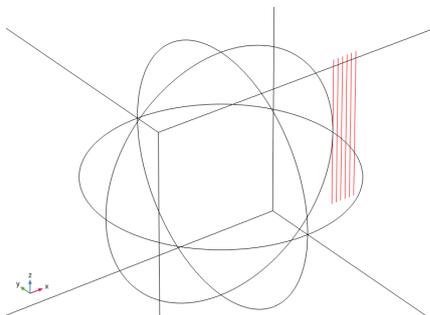


Figure 4. Volume arrow diagram of the magnetic field surrounding the permanent magnet  
图 4. 永磁体周围磁场的体箭头图

### 2.3. 永磁铁周围磁场截线分析

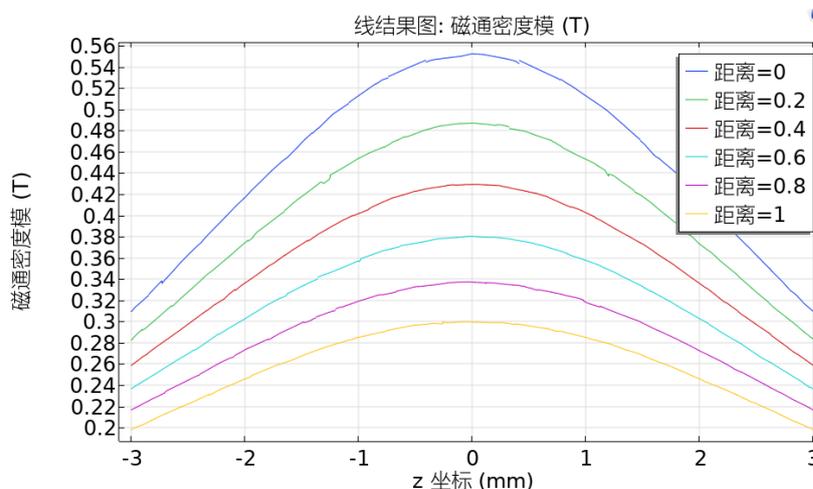
为了更直观地定量展示磁铁周围的磁场分布，可以观测磁场周围各点处的磁感应强度，方法选择绘制一维绘图组。利用 COMSOL 软件，能够在空间域内创建任意的三维截线。为此，在 X 轴正方向上，选择不同距离 X 轴磁球表面的截线，具体距离分别为 0、-0.2、-0.4、-0.6、-0.8 和 -1 mm，以展示磁场分布的变化情况。图 5 中的(a)部分展示了沿着磁球 X 轴正方向、Z 坐标范围从 -3 mm 至 3 mm (Y 坐标固定为 0) 的六条三维截线，并据此绘制了这些截线上各点磁通密度模值的一维图形。而图 5 的(b)部分则呈现了沿 X 轴正方向、位于磁球表面不同距离处的 Z 轴平行线上各点的磁通密度模值。观察这些图形可以发现，由于磁铁的半径为 5 mm，在磁铁的凸出部分，磁场的变化率最为显著。因此，当磁铁发生移动时，这些变化率较高的区域将诱发更高的感应电动势。在紧邻磁铁表面的位置(例如距离 0.2 mm 的平行线)，磁场强度由磁铁边缘向中心逐渐增强。随着与磁铁距离的加大(例如 0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm 和 1 mm 处的平行线)，这种趋势依旧存在，即磁场强度从边缘向中心逐渐增大。总体来看，磁场变化率最大的区域依然集中在磁铁的凸出部分。



**Figure 5.** (a) 3D cross-sectional map set in the +X direction, (b) Magnitude of magnetic flux density along cross-sectional lines in the +X direction

**图 5.** (a) +X 方向三维截线图组, (b) +X 方向各截线上的磁通密度模

同样地,我们在磁铁表面沿 Z 轴正方向,设置了若干条与 X 轴平行的三维截线,这些截线分别位于距离磁铁 0 mm、0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm 及 1 mm 的位置。图 6 中的(a)部分展示了这一组三维截线的布局,它们覆盖了从-3 mm 到 3 mm 的 X 坐标范围,此时的 Y 坐标为 0。随后我们利用这六条截线的数据集,创建了一系列关于各点磁通密度模的一维图表。图 6 的(b)部分则揭示了,在 X 轴上,与原点中心保持不同距离的、平行于 X 轴的直线上,各点磁通密度模的分布状况。观察发现,由于磁铁的半径设定为 5 mm,磁场在紧邻磁铁表面的位置(即 X 坐标为 0mm 处)展现出最大的变化率,这也意味着该位置会产生较大的感应电动势。从磁铁边缘向两侧延伸,磁场强度逐渐降低。这个结果与先前在 X 轴正方向上所做的三维截线结果图相同,磁铁变化率最大的位置仍为磁铁距离截线最近的位置。但与先前实验有所不同的是,相同距离的截线上相同点的磁通密度模均小于图 5(b)中的磁通密度,在距离磁铁位置为 0 mm 的两条不同位置截线上, X 轴正方向截线上的最大磁通密度为 0.557 T,最小磁通密度为 0.316 T,而在 Z 轴正方向截线上的最大磁通密度为 0.347 T,最小磁通密度为 0.259T,可以看出 X 轴正方向截线上的磁通密度模总是大于相同距离下 Z 轴正方向上截线的磁通密度,这一结果在距离磁铁表面 0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm 及 1 mm 的位置均有体现。出现这种情况的原因是一开始规定的磁极方向为 X 轴方向,磁铁的 N 极为 X 轴正方向,磁铁的 S 极为 X 轴的负方向,在这两处的磁力线最为密集,相应的磁通密度也就越大。



**Figure 6.** (a) 3D cross-sectional map set in the +Z direction, (b) Magnitude of magnetic flux density along cross-sectional lines in the +Z direction

**图 6.** (a) +Z 方向三维截线图组, (b) +Z 方向各截线上的磁通密度模

### 3. 结论

本文采用 COMSOL 软件模拟了半径为 5mm 的球形微型永磁体的磁场分布, 并运用切片视图与体积箭头图示对磁体周遭的磁场进行了三维视觉化的解析, 在小磁珠越近的位置磁场越强, 体箭头也越密集。同时, 通过一维图表集合, 我们分析了磁铁边缘平行路径上各点的磁场特性, 在每条平行路径上, 距离小磁珠越近的点位磁场强度越大, 反之磁场强度越小。此分析表明, COMSOL 软件能够直观且精确地展示磁体周围特定截面及平行线上的磁场情况, 尤其对于形状特殊或组合式磁铁的磁场分析, 这些仿真技术展现出了极高的实用价值。将 COMSOL 软件应用于磁场仿真分析, 有助于学生在物理实验中更形象地把握磁场分布, 进而提升大学物理实验教学的效果。

### 参考文献

- [1] 刘少飞. 永磁系统与通电线圈静磁场求解以及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [2] 许志伟, 刘志华, 彭晓, 等. 不对称平衡变压器三维静磁场仿真分析[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2018, 28(1): 10-13.
- [3] 李立娜, 李大超, 袁永杰. 无刷旋转变压器的磁路设计及仿真分析[J]. 微特电机, 2015, 43(8): 53-56.
- [4] 刘玉萍, 廉自生. 本质安全型电磁铁的特性仿真[J]. 煤矿机械, 2011, 32(5): 50-53.
- [5] 闫林波, 何欣波, 魏兵, 等. 基于 COMSOL 动网格的电磁轨道炮动态电磁特性仿真[J/OL]. 强激光与粒子束, 1-7. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1311.O4.20241217.1046.004.html>, 2025-01-07.
- [6] 蔡笑风, 章磊, 孙焱. 基于 COMSOL 的粘接结构超声检测仿真分析[J]. 湖北理工学院学报, 2024, 40(5): 7-12.