



# Halbach 阵列基于Comsol 的有限元模拟及其应用

---



汇报人：孙树文



## 目录

**1** 研究背景

---

**2** Halbach阵列的基本原理

---

**3** Halbach阵列的衍生物

---

**4** 应用，展望与不足

---

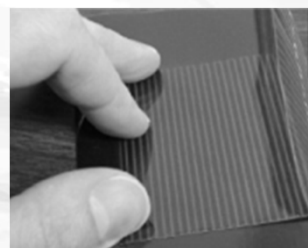
# PART 01

## 研究背景



## 研究背景

不知大家有没有曾经偶然间发现冰箱贴的背面是几乎没有磁性的呢？这就是因为冰箱贴背面的磁铁采用的是Halbach阵列的排布。这个磁体结构分布是由美国劳伦斯伯克利国家实验室的Klaus Halbach教授在1979年做电子加速实验时发现的。



## 关于我的研究

---

我的研究从Halbach阵列的磁场分布入手，探究了几种不同形式Halbach阵列的磁场，并且分别用解析解和有限元模拟给出一维阵列以及永磁魔环的磁场分布，最后由计算与模拟结果给出永磁魔环在实际应用中的价值。

# PART 02

Halbach阵列的基本原理

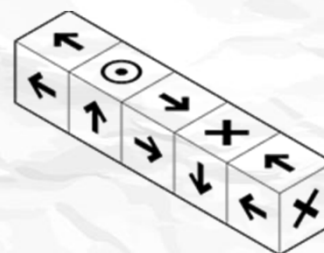
---



## 基本原理

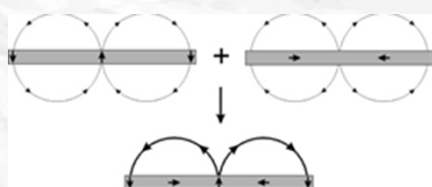
理想的Halbach阵列是由一块长条状的永磁体组成，其中永磁体的磁化强度是按照正弦函数的形式连续变化的。而由它形成的磁场具有两个独特的性质：1.另一侧的磁感应强度恰好抵消，形成绝对的单边磁场；2.单侧的磁场按照正弦曲线的方式分布。

而在现实生活中，这样理想的永磁体是极难制作的，所以在应用过程中我们往往会采用近似正弦函数的磁化方向排布来得到不那么严格的单边磁场。



## 基本原理

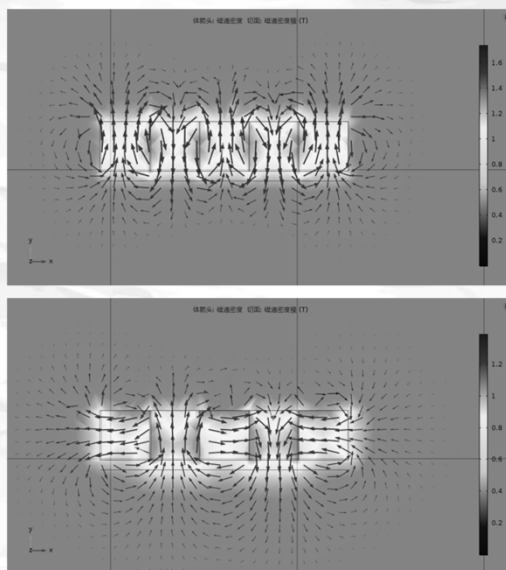
我们可以由叠加原理先来定性地分析一下这样的排布产生单边磁场的原因。如下图所示，我们可以将这两个永磁体分别单独考虑，再运用叠加原理即可得出结论。





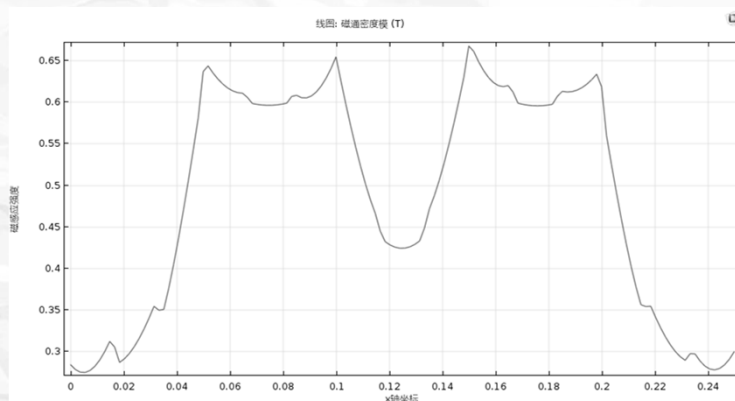
## 初步探究

首先让我们通过有限元模拟，具体了解一下直线型阵列的磁感应强度分布。在本文中，均采用N50型钕铁硼磁铁进行模拟，其磁化强度M的大小为 $1.154 \times 10^6$  A/m，相对磁导率为1.05，外部介质为空气。通过对比可以看出，按Halbach阵列排布的永磁体可以产生明显的单边磁场。



## 基本原理

我们还可以模拟出在阵列的上端与其距离给定的直线上磁感应强度的变化。虽然不是太像正弦曲线，但是依然具有良好的对称性。

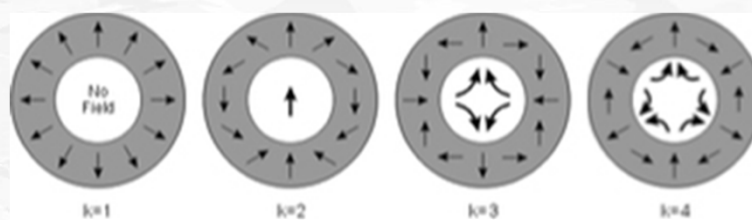


# PART 03

## Halbach阵列的衍生物



## Halbach阵列的衍生物

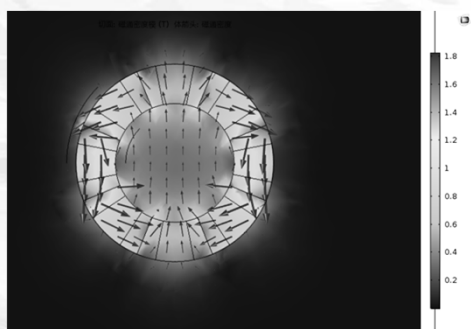


阵列的衍生物主要都是环形对称形式  
而我主要研究的是 $k=2$ 和 $k=4$ 的情况。



## k=2——应用最为广泛的“永磁魔环”

针对这个模型，我构建了由八块永磁体构成的魔环结构，并通过有限元分析得出它在水平切面上磁场的分布，具体的计算结果如下图所示

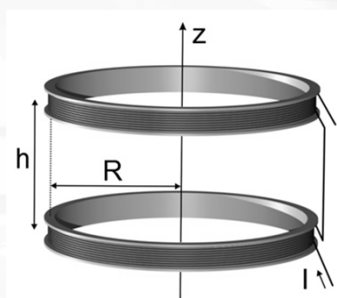


可以看到，永磁体在中心的圆形区域中产生近似的匀强磁场，而在外部区域的磁感应强度几乎为0,这体现的是另外一种类型的磁单极子性质。而从这样良好的对称性出发，我们可以从它的身上寻找到许多优良的实用价值。比如，我们在下文将要具体研究的磁场控制器。



## k=2——应用最为广泛的“永磁魔环”

现在一般使用的静磁场产生器一般是赫姆霍兹线圈。然而在电压不稳定的情况下，静磁场的产生便会受到影响，下面我们构造一种永磁魔环的结构，它在一定程度上可以取代赫姆霍兹线圈。



$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 n I}{R}$$



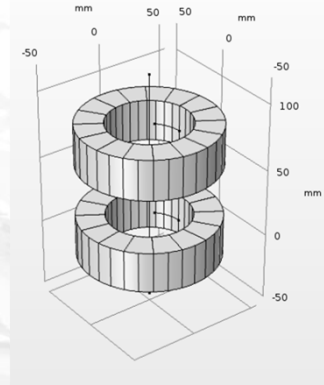
## k=2——应用最为广泛的“永磁魔环”

我们首先建立一个包含有两个八极子的永磁魔环结构，如下图所示，并将它们磁化强度的方向均设置成为k=2时的情形。下面首先求出两环中心轴线上磁感应强度的解析解。

假设永磁体均匀磁化，那么它在空间中的场强可以由磁化面电流来等效求出。

$$\vec{K} = \vec{M} \times \vec{n}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_S \frac{(\vec{M} \times \vec{n}) \times \vec{R}}{R^3} dS$$



## 磁化面电流等效求解

$$\vec{B}_{j1} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{S_{ABCD}} \frac{-m_0(h - \frac{H}{2})\cos\theta_j \vec{i} - m_0(h - \frac{H}{2})\sin\theta_j \vec{j} - m_0 r \cos(\varphi - \theta_j) \vec{k}}{(r^2 + h^2)^{3/2}} dr d\theta$$

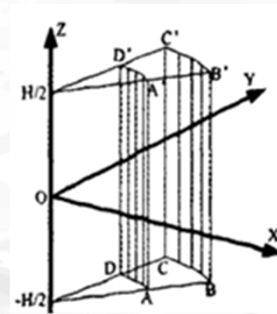
$$\vec{B}_{j2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{S_{ABCD}} \frac{m_0(h + \frac{H}{2})\cos\theta_j \vec{i} + m_0(h + \frac{H}{2})\sin\theta_j \vec{j} + m_0 r \cos(\varphi - \theta_j) \vec{k}}{(r^2 + h^2)^{3/2}} dr d\theta$$

$$\vec{B}_{j3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{S_{ABB'A'}} \frac{rm_0 \sin\theta_1 \cos(\theta_j - \theta_1) \vec{i} - rm_0 \cos\theta_1 \cos(\theta_j - \theta_1) \vec{j}}{(r^2 + (h-z)^2)^{3/2}} dr dh$$

$$\vec{B}_{j4} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{S_{CDD'C'}} \frac{-rm_0 \sin\theta_2 \cos(\theta_j - \theta_2) \vec{i} + rm_0 \cos\theta_2 \cos(\theta_j - \theta_2) \vec{j}}{(r^2 + (h-z)^2)^{3/2}} dr dh$$

$$\vec{B}_{j5} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{S_{ADD'A'}} \frac{-R_1 \sin\varphi \sin(\varphi - \theta_j) \vec{i} + R_1 \cos\varphi \sin(\varphi - \theta_j) \vec{j}}{(R_1^2 + (h-z)^2)^{3/2}} dz d\varphi$$

$$\vec{B}_{j6} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{S_{BCC'B'}} \frac{R_2 \sin\varphi \sin(\varphi - \theta_j) \vec{i} - R_2 \cos\varphi \sin(\varphi - \theta_j) \vec{j}}{(R_2^2 + (h-z)^2)^{3/2}} dz d\varphi$$







## 磁化面电流等效求解

从上述求解过程中，我们最终得到分块j总的磁感应强度为

$$\vec{B}_{\text{分块}j} = \sum_{i=1}^6 \vec{B}_i$$

于是整个永磁魔环在轴线所产生的磁感应强度为

$$\vec{B}_{\text{总}} = \sum_{j=1}^8 \vec{B}_{\text{分块}j}$$



## 计算结果分析

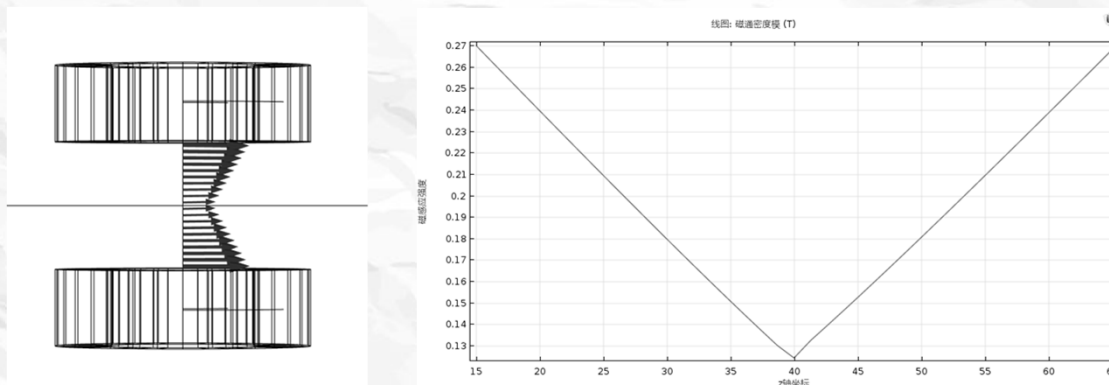
从结果中，可以很明显地看出磁感应强度只有x-y平面上的分量，并且由对称性的分析也可以很容易得到，磁感应强度在x轴方向上的分量被相互抵消，故总的磁感应强度只有y轴上的分量。由以上计算结果，我们带入两个永磁魔环的情况下分析，很容易得到磁感应强度在中轴线上的变化是呈线性的。





## 模拟检验

在求得其解析解之后，我们再使用有限元模拟，在设置两环上下表面间距离等于其内外半径的平均值后，在中轴线上构造线元。计算出轴线上的磁感应强度大小方向均沿y方向，并且呈良好的线性关系，磁感应强度位于0.12~0.27 T之间，如下图所示。



## 思考

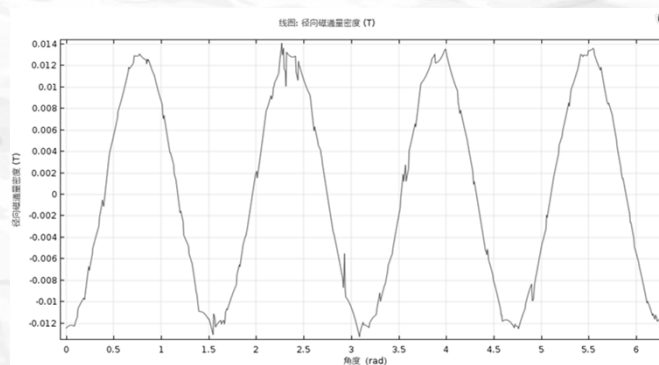
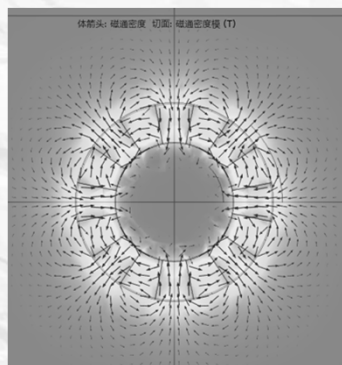
在以上的分析与求解中，我们发现了“永磁魔环对”所产生的磁场在轴线上的分布有很强的规律性，它是一种良好的静磁场产生器。该装置中心处的磁感应强度恒处于x-y平面中，不仅可以通过改变两环间的距离来改变磁场的大小，而且可以通过整体的转动改变磁感应强度的方向。如果在上方的永磁魔环外侧套一个环形磁铁，那么就可以产生z轴方向的磁场，从而轴心处的磁场大小与方向都可以在一定范围内任意调节。





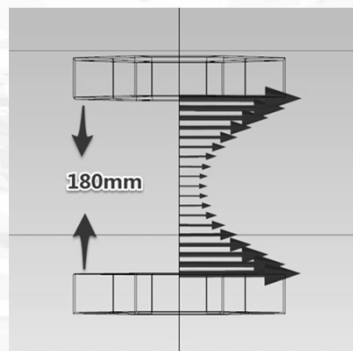
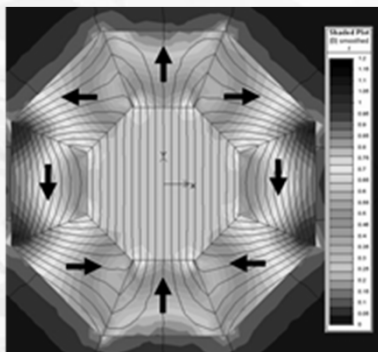
## k=4—类似于直线型阵列的磁单极子

针对k=4的情形，由于该永磁体结构在内圆环中产生的磁场趋近于零，所以构建16极子的Halbach阵列模型，以求出更精确的磁场分布。



## 八边形Halbach阵列

如右图所示是k=2的结构所产生的磁场，该结构与永磁魔环形类似，但是在组成一对阵列之后，在轴线上的磁感应强度大小分布不同于魔环的线性分布，同样可以制造磁场产生器。



# PART 04

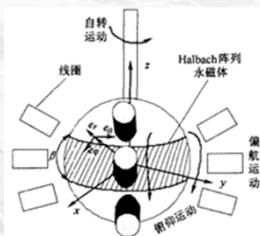
应用，展望与不足



实际应用

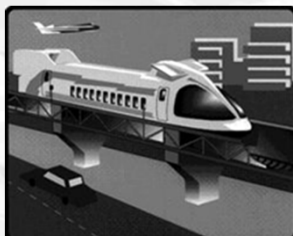
## 1

永磁电机



## 2

磁悬浮列车



## 3

Something else  
you can  
imagine

.....



## 不足与展望

1.由Halbach阵列所构造的静磁场产生器存在一些缺点，比如：在定点产生的磁场没有赫姆霍兹线圈那么均匀。而这也给实际的运用造成了一定的困难。

2.个人pc的内存只有8GB，限制了有限元分割的精确度。

虽然模型比较粗糙，但是作者相信这样的设想仍具有一定的参考价值。



## 参考文献

- [1] Li, Chunsheng, Du, Yumei, Xia, Pingchou. Analysis and experimental testing of EDS maglev with linear Halbach and conducting sheet[J], 2009, 24(1): 18-22.
- [2] 周赣, 黄学良, 沈妍. Halbach型永磁阵列的磁场分析[J]. 微特电机, 2008(07): 6-8.
- [3] 周赣, 黄学良, 周勤博. Halbach型永磁阵列的应用综述[J]. 微特电机, 2008(08): 58-61.
- [4] 金欣, 林鹤云. 基于等效面电流模型的AMS永磁体磁场解析分析[J]. 中国科技信息, 2009(02): 41-43.
- [5] 夏长亮, 李洪凤, 宋鹏. 基于Halbach阵列的永磁球形电动机磁场[J]. 电工技术学报, 2007(07): 130-134.
- [6] 王凤翔. Halbach阵列及其在永磁电机设计中的应用[J]. 微特电机, 1999(04): 22-24.
- [7] 胡友秋, 程福臻, 叶邦角编著. 电磁学与电动力学 上[M]. 科学出版社, 2008.



谢谢聆听！

Presented  
by 孙树文