三段气隙磁片分布方式对磁芯局部饱和影响的分析与研究

摘要： 针对磁芯中柱分奇数段气隙时，因加工局限导致无气隙垫片段与有垫片段深度不一致，进而引发磁芯局部饱和的问题，本文对比分析了传统堆叠式分布与新理念对称式分布对磁路的影响。基于 WAXWELL 仿真软件，设定了三种气隙深度分配工况进行验证。结果表明：当气隙深度不均时，将深度异常的无垫片气隙段置于磁芯中心位置（对称分布），可有效改善磁路空间分布的对称性，抵消边缘磁通畸变。在 1/1/1.5 工况下，对称分布方式较传统堆叠方式可将局部最大磁通密度从 360mT 降至 324mT，显著降低了局部饱和风险。本文的研究为多段气隙磁芯的装配工艺提供了理论依据与设计规范。

关键词： 磁芯；三段气隙；局部饱和；磁路对称；气隙垫片；MAXWELL 仿真分析

1. 引言

在磁性元器件设计中，为减少漏磁和绕组损耗，磁芯中柱常采用多段气隙结构。当磁芯中柱分为 3 段气隙时，通常包含 2 段由气隙垫片隔离的气隙和 1 段无气隙垫片的研磨气隙。传统装配方式倾向于将 2 个磁片和 2 个气隙垫片全部安装在同一侧磁芯上，这种堆叠式组装虽然工时成本较低，但在实际加工中，无垫片段的气隙深度很难与有垫片段保持绝对一致。这种气隙深度的不一致性是否会对磁路产生不利影响，以及如何通过结构布局优化来消除该影响，是工程实践中亟待解决的问题。本文通过 WAXWELL 仿真，深入探究不同气隙分布方式对磁芯局部饱和的具体影响及其物理机理。

2. 仿真模型与工况设定

2.1 结构模型

模型采用具有三段气隙的磁芯中柱，其中两段由气隙垫片隔离（深度一致），另一段为无气隙垫片段。对比两种分布方式：

传统方式： 2 个磁片和 2 个气隙垫片全部安装在同一侧磁芯上。

新理念方式（对称分布）： 1 个磁片+1 个气隙垫片安装在顶部磁芯，另 1 个磁片+1 个气隙垫片安装在底部磁芯，无垫片段居中。

2.2 工况设定

为研究气隙深度分配关系的影响，设定三种仿真工况（数字代表气隙深度的相对比例）：

工况一（1/1/1）： 气隙均匀分配，作为基准对照。

工况二（1/1/1.5）： 气隙不均，无气隙垫片的那段气隙深度最大。

工况三（1/1/0.8）： 气隙不均，无气隙垫片的那段气隙深度最小。

3. 仿真结果与分析

3.1 均匀气隙工况（工况一）

在 1/1/1 的均匀分配工况下，仿真结果显示磁芯 B 值分布一致，未出现局部饱和风险。此工况证明当气隙深度绝对一致时，分布方式对磁路影响较小。

3.2 非均匀气隙工况（工况二与工况三）

在工况二和工况三中，由于无垫片段气隙深度存在偏差，仿真结果均显示出磁路不均的情况，局部饱和风险增加。其中，以工况二（1/1/1.5）为例，对比两种分布方式的仿真结果：

传统方式(1.5 置于顶部)：磁芯 B 值分布出现明显差异，局部最大磁通密度 B_Max = 360mT，局部饱和风险急剧增加。

新理念方式（1.5 置于中部）： B 值分布更均匀，局部最大磁通密度 B_Max = 324mT，较传统方式下降了 10%，局部磁饱和密度显著降低。

仿真数据直观地表明，在气隙深度不一致的情况下，将深度异常段置于中部（对称分布）能够有效抑制局部饱和。

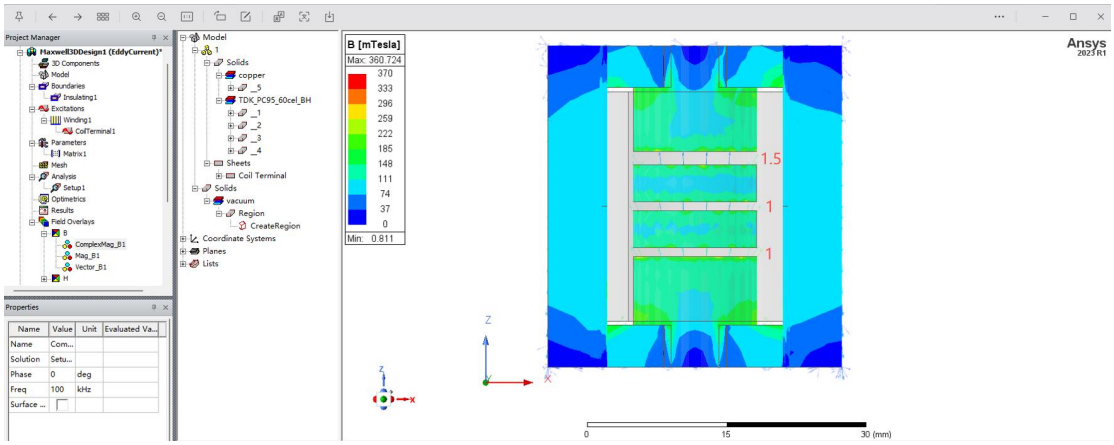


图 1 工况二 传统方式 1.5 置于顶部

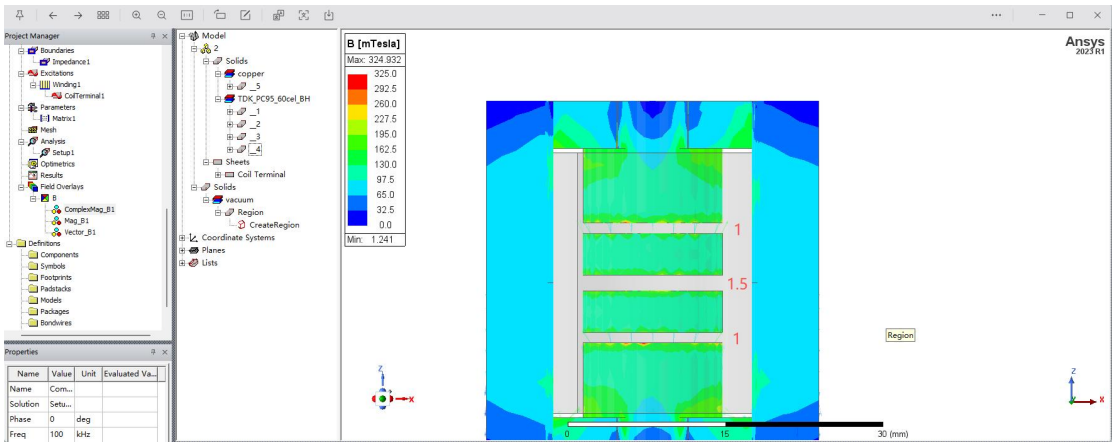


图 2 工况二 新方式 1.5 置于中部

4. 机理探讨

为何工况二和工况三会出现明显的局部饱和趋势，且对称分布能起到改善作用？其核心在于气隙的物理对称性与磁路分布的耦合关系：

加工特性的局限： 磁芯分奇数段气隙时，无气隙垫片的那一段（通常为中心柱研磨段）其深度在实际加工中很难与有垫片的段做到绝对一致。

不对称加剧局部饱和：当这种深度不一致的气隙全部堆叠在同一侧磁芯时(传统装配方式)，会导致磁路在空间分布上极度不对称。磁通在气隙边缘发生严重畸变和挤压，从而大大增加局部饱和的风险。

对称分布抵消偏磁：若将无气隙垫片的那一段放置在磁芯中心位置(新理念上下分布方式)，上下两侧的气隙特征形成物理对称。这种对称结构使得磁路分布重新趋于均衡，边缘磁通的畸变能够相互抵消，从而显著减小局部饱和的影响。

5. 工程应用与设计规范

虽然新理念方式将垫片分置于上下磁芯，在一定程度上增加了工时成本，但其换取了磁路的空间对称性，有效降低了因气隙深度不一致带来的局部饱和风险，在电磁性能上是完全合理的。

基于上述分析，提出以下磁芯设计规范参考：

当磁芯分奇数段气隙时，若受加工精度限制无法保证各段气隙深度绝对一致，应将无气隙垫片的那段（即深度不同段）置于磁芯中心位置，以保持磁路的空间对称性，规避局部饱和风

险。

6. 结论

本文通过 WAXWELL 仿真与理论分析，研究了三段气隙磁片中垫片分布方式对局部饱和的影响。结果表明：气隙深度的不一致性是导致局部饱和的潜在因素；采用上下对称分布的装配方式（将无垫片气隙段置于中心），可有效平衡磁路空间分布，抵消边缘磁通畸变，将局部最大磁通密度降低约 10%。该研究为解决奇数段气隙磁芯的局部饱和问题提供了有效的工程指导。

姓名：赵伟　　公司：威海东兴电子有限公司　　联系方式 18660369724　邮箱：yf51@e-dongxing.com