

# 电动振动台气隙磁通和台面漏磁优化研究

李 杨<sup>1,2\*</sup>, 曹小波<sup>1,2</sup>, 张奎华<sup>1,2</sup>, 夏树杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北京强度环境研究所, 北京

<sup>2</sup>北京航天希尔测试技术有限公司, 北京

收稿日期: 2022年6月24日; 录用日期: 2022年8月16日; 发布日期: 2022年8月24日

## 摘 要

电动振动台的气隙磁通和台面漏磁是两个重要的性能指标。要求台面漏磁尽可能小,气隙磁通尽可能大。目前增大气隙磁通的一般方法是增加励磁线圈的安匝数,但是这样会导致台面漏磁同步增大。可以通过在台面上添加消磁线圈的方式来减小台面的漏磁,但这种方法在设计、制造和使用中不太方便,甚至会在某些位置产生更大的杂散磁场。根据使用经验,适当减小上下励磁线圈的安匝数之比可以有效减小台面漏磁的大小。本文针对此现象,仿真研究了在相同励磁安匝数下,不同的上下励磁安匝比对气隙磁通和台面漏磁的影响。本文综合考虑气隙磁场和台面漏磁,确定了振动台设计时平衡气隙磁通与台面漏磁的一种新方法。

## 关键词

电动振动台, 气隙, 磁通, 漏磁

# Optimization Research of Air Gap Flux and Table Magnetic Flux Leakage in Electrodynamical Vibration Generator

Yang Li<sup>1,2\*</sup>, Xiaobo Cao<sup>1,2</sup>, Kuihua Zhang<sup>1,2</sup>, Shujie Xia<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Beijing Institute of Structure & Environment Engineering, Beijing

<sup>2</sup>Beijing Vibration Test Equipment Engineering and Technology Research Center, Beijing

Received: Jun. 24<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 16<sup>th</sup>, 2022; published: Aug. 24<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Air gap magnetic flux and magnetic flux leakage on the table are two important performance indi-

\*第一作者。

cators of the electrodynamic vibration generator. It's required that the magnetic flux leakage should be as small as possible and air gap magnetic flux should be as large as possible. At present, the general method of increasing the air gap magnetic flux is to increase the ampere-turns of the excitation coil, but the magnetic flux leakage will increase synchronously. The magnetic flux leakage can be reduced by adding a degaussing coil, but it is inconvenient in the design, manufacture and use, and even generates larger stray magnetic fields in some locations. According to the use experience, appropriately reducing the ampere-turns ratio of upper and lower excitation coil can effectively reduce the magnetic flux leakage. Aiming at this phenomenon, it's simulated that the influence of different upper and lower excitation ampere-turns ratio on air gap flux and magnetic flux leakage when the when the number of ampere-turns remains unchanged. In this paper, considering the air gap magnetic field and the surface magnetic flux leakage, a new method of balancing the air gap flux and the surface leakage is established.

## Keywords

Electrodynamic Vibration Generator, Air Gap, Magnetic Flux, Magnetic Flux Leakage

Copyright © 2022 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

电动振动台是振动试验中最常用的激振设备。典型的振动台结构简图如图 1 所示。动圈所处气隙的磁通和台面的漏磁是振动台重要的性能指标。振动台气隙磁通越大，推力越大。气隙中的磁通由上下励磁线圈通入方向相反的直流电产生，通常会选择增大励磁线圈安匝数的方式来增大气隙磁通，但同时会导致台面漏磁增大。振动台台面漏磁过大不仅响信号采集，还可能会对某些敏感试件造成不利影响。国标要求距台面安装螺孔的最大分布圆直径 1/4 高度处的整个平面上(下文称之为 A<sub>LM</sub> 平面),漏磁应小于 1 mT [1]。

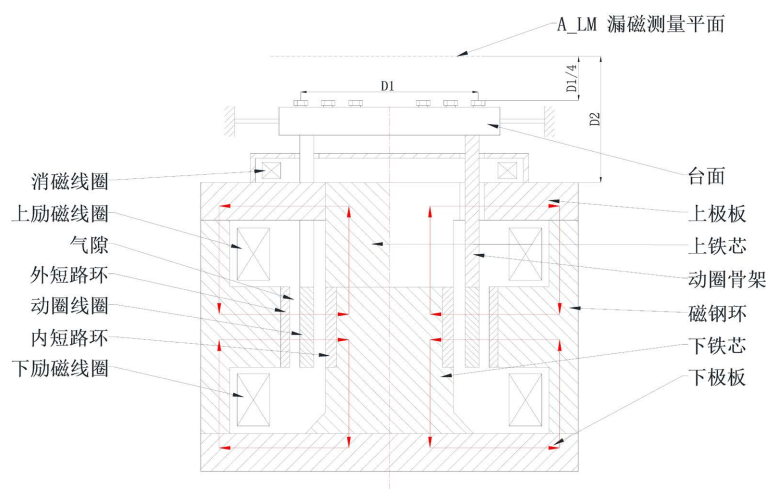


Figure 1. Structure diagram of electrodynamic vibration generator

图 1. 电动振动台结构简图

由于上铁芯要给动圈留出运动空间，上铁芯被分成八瓣，其俯视图见图 2，留出了空气间隙，导致上台面有更多漏磁产生，现在一般采用安装消磁线圈的方式来抵消漏磁[2]。但是由于台面的杂散磁场分布不均，消磁线圈反而会增强局部位置的杂散磁场，而且在振动台使用过程中进行高/低励磁切换时，还需要同时改变消磁线圈的电流大小，在设计、制造和使用中都不太方便。根据过去的设计使用经验显示，适当减少上励磁匝数可以减弱台面漏磁，甚至无需添加消磁线圈。

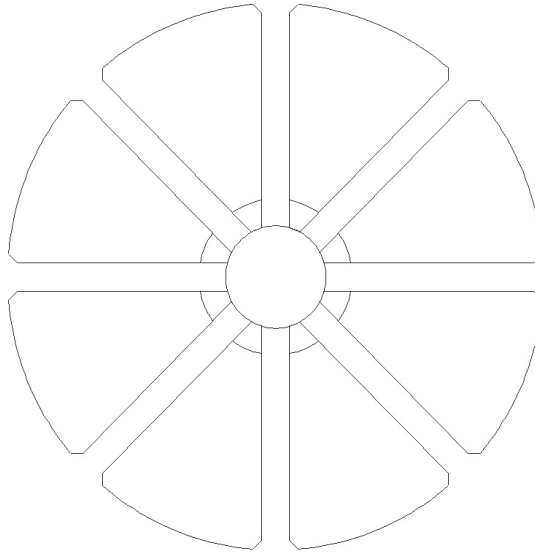


Figure 2. Top view of upper iron core  
图 2. 上铁芯俯视图

本文借鉴磁场仿真分析方法在振动台、电机等特性分析中的应用[3] [4] [5] [6] [7]，以某双磁路大推力电动振动台为例，仿真研究在保证上下励磁线圈安匝数不变的情况下，不同的上下励磁安匝数之比对气隙磁场和台面漏磁的影响，为减小台面漏磁提供了新的解决方法。

## 2. 结构组成及工作原理

如图 1 所示，电动振动台的磁路系统主要由上下励磁线圈、上下极板、磁钢环、上下铁芯和气隙组成。上下励磁线圈分别通入方向相反的直流电，会产生箭头所示的磁场。处在气隙中的动圈通入交流电，便会受到交变的磁场力，这个力就是振动台的推力，振动台的推力和气隙中的磁通大小呈正相关。受制于振动台的特殊结构，上铁芯被剖成八瓣，导致台面存在漏磁场。气隙磁通和台面漏磁均由励磁线圈产生，励磁电流越大，二者越强。漏磁还和材料的磁导率、工件的形状尺寸、表面缺陷的深度和方向有关。故减小漏磁的思路一方面是增大材料的磁导率，减小工件表面及内部的缺陷，另一种方法是减小励磁电流，但这样会使气隙磁通受到损失。

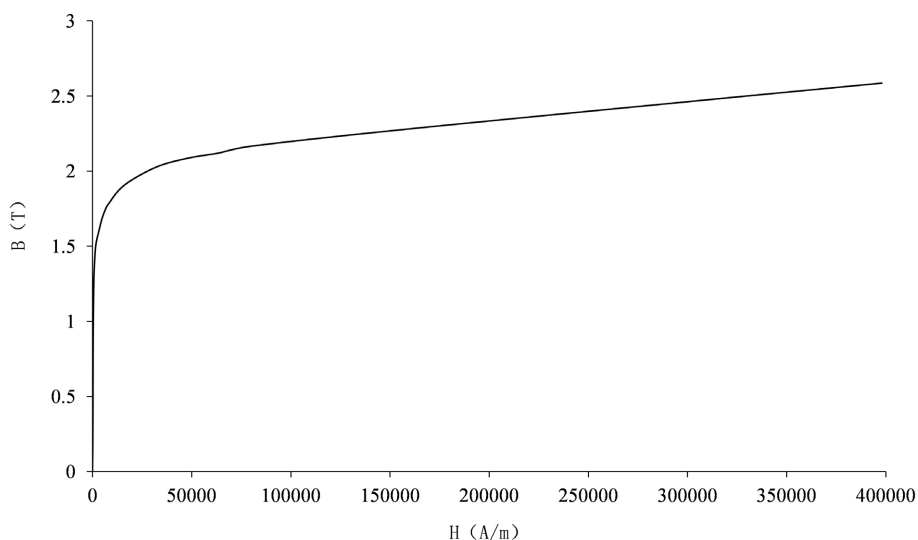
## 3. 仿真分析过程

### 3.1. 几何建模与网络划分

振动台主要部件的材料及其相对磁导率见表 1。上下极板、磁钢环和铁芯是主要的导磁结构，导磁率为非线性变化的曲线，见图 3。动圈骨架、动圈线圈、内外短路环的相对磁导率都近似为 1，可以认为与空气相同，将四者等效为空气建模。利用电动振动台磁路的对称性，建立 1/4 计算模型。模型及网络划分见图 4。

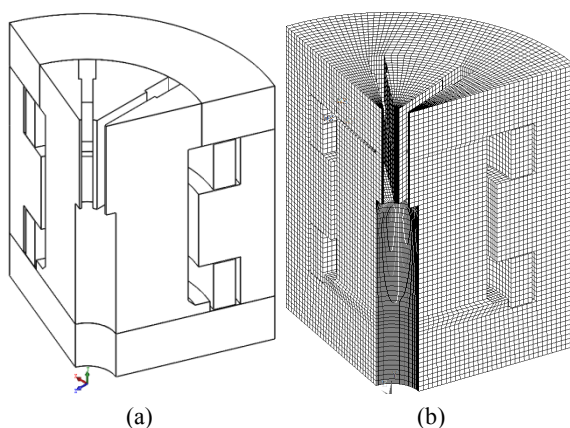
**Table 1.** Part material and relative permeability  
**表 1.** 零部件材料及相对磁导率

部件	动圈骨架	动圈线圈	内外短路环、励磁线圈	上下极板、磁钢环、铁芯
材料	铸铝	纯铝	紫铜	优质碳素结构钢 08F
相对磁导率	1.000022	1.000022	0.99990	B-H 曲线[8]



**Figure 3.** B-H curve (magnetization curve) of 08F steel

**图 3.** 08F 钢的 B-H 曲线(磁化曲线)



**Figure 4.** (a) Geometric model; (b) Meshing

**图 4.** (a) 几何模型; (b) 网格划分

为提高计算效率与精度,采用 20 节点六面体单元 solid236 对台体进行网络划分。同时为了计算漏磁,在台体外部建立了半径 6 米的球形空气模型,见图 5,并细化了台面漏磁观测区域(即 A\_LM 平面)和动圈所处气隙的网络。在外边界和对称平面上设置通量平行边界条件。

### 3.2 分析条件

上下励磁线圈总共 320 匝,励磁电流为 400 安培,分析中保证上下励磁线圈的安匝数为  $320 \times 400 = 128,000$  [安匝]不变,只改变上下励磁的安匝数之比,测量气隙磁通与台面的漏磁大小。计算条件见表 2。

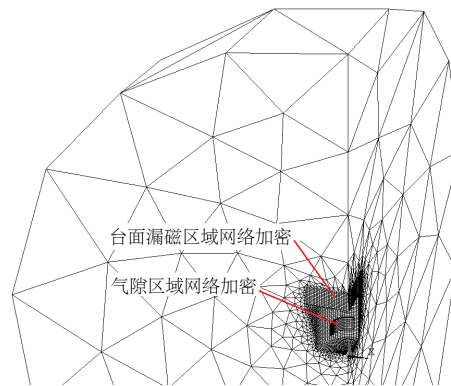


Figure 5. Finite element model of peripheral air  
图 5. 外围空气有限元模型

Table 2. Upper and lower excitation ampere-turn ratio and number of turns  
表 2. 上下励磁安匝比与匝数

安匝比	上励磁匝数	下励磁匝数
0.6	120	200
0.7	132	188
0.8	142	178
0.9	152	168
1.0	160	160
1.1	168	152
1.2	175	145

### 3.3. 仿真结果与分析

#### 3.3.1. 上下励磁安匝比对气隙磁通的影响

不同安匝比下气隙的磁通大小见表 3 与图 6，其数值为气隙中磁通密度的均值。计算结果表明：当上下励磁线圈的安匝数之和一定时，气隙磁通密度随安匝比的变化呈拱形：安匝比在 1 附近时，气隙磁通最大，安匝比越偏离 1，气隙磁通越小，下降速度越快。气隙磁通的分布整体上较为均匀，磁感线方向垂直于气隙，图 7 显示其磁通密度的分布情况。

安匝比为 0.8 时，气隙磁通为 1.7391 T，其值是最大值 1.7532 T 的 99.2% (安匝比为 1 时)。可见，当安匝比在 0.8~1.2 之间，没有过分远离 1 时，气隙磁通的值可保持在高位。这说明小幅调整上下励磁的安匝数之比不会使气隙磁通明显下降。

#### 3.3.2. 上下励磁安匝比对台面漏磁的影响

仿真后测量 A<sub>LM</sub> 平面的最大漏磁，不同安匝比下的台面漏磁见表 4 和图 8，其值为漏磁通的最大值。计算结果显示：当上下励磁的安匝数之和一定时，台面漏磁在上下励磁安匝比为 0.7 时最小，其值为 1.098 mT，安匝比越偏离 0.7，台面漏磁越大。这也证实了引言中所述的现象：适当减小上下励磁安匝

Table 3. Air gap flux density at different ampere-turn ratios  
表 3. 不同安匝比下的气隙磁通密度

安匝比	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
气隙磁通密度/T	1.6544	1.7134	1.7391	1.7512	1.7532	1.7512	1.7448

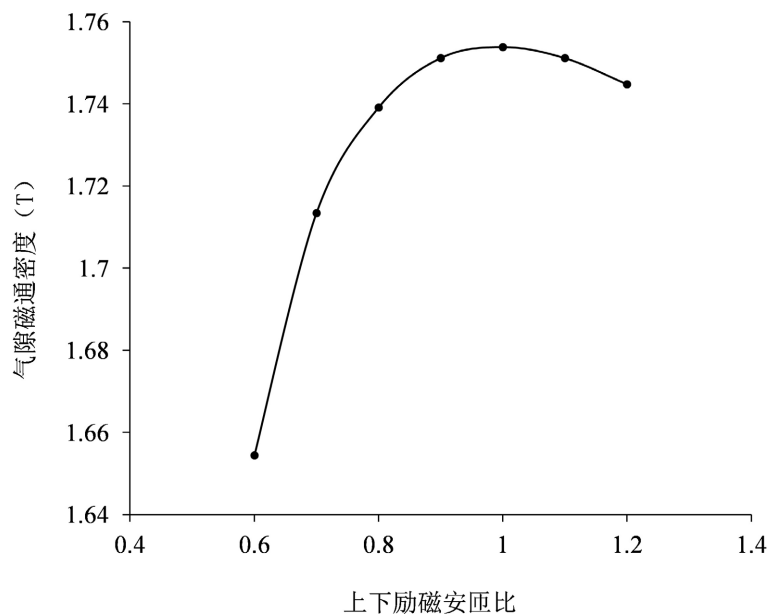


Figure 6. Air gap flux density at different ampere-turn ratios

图 6. 不同安匝比下的气隙磁通密度

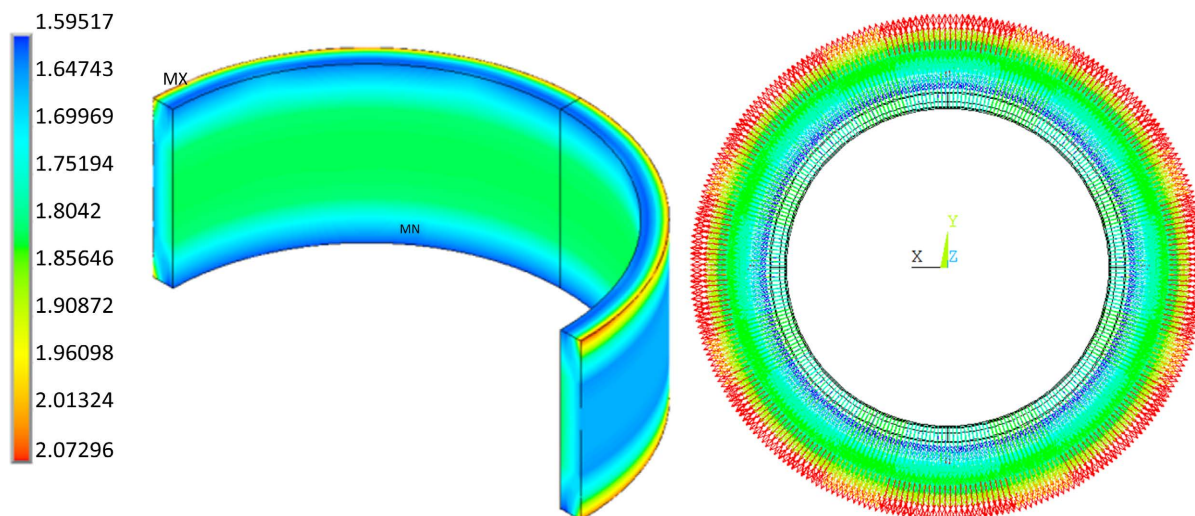


Figure 7. Air gap flux density distribution (Ampere-turn ratio = 1.0)

图 7. 气隙磁通密度分布(安匝比 = 1.0)

比可以减小台面的漏磁。

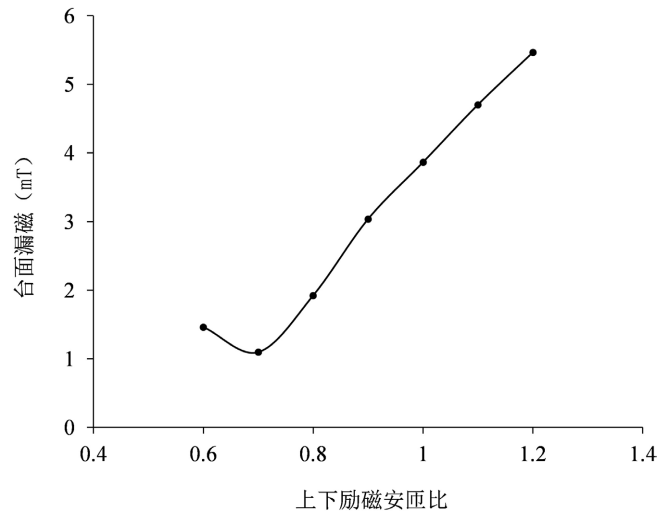
漏磁平面的磁通分布见图 9，依次是安匝比为 0.6、0.7、0.8、1.0 的漏磁结果。安匝比大于 0.7 时，漏磁平面最大漏磁点在漏磁平面的正中间，即台面的正上方，通常也是被试件放置的位置；安匝比小于 0.7 时，漏磁平面正中间的漏磁通反而最小。

Table 4. Tabletop flux leakage under different ampere-turn ratios

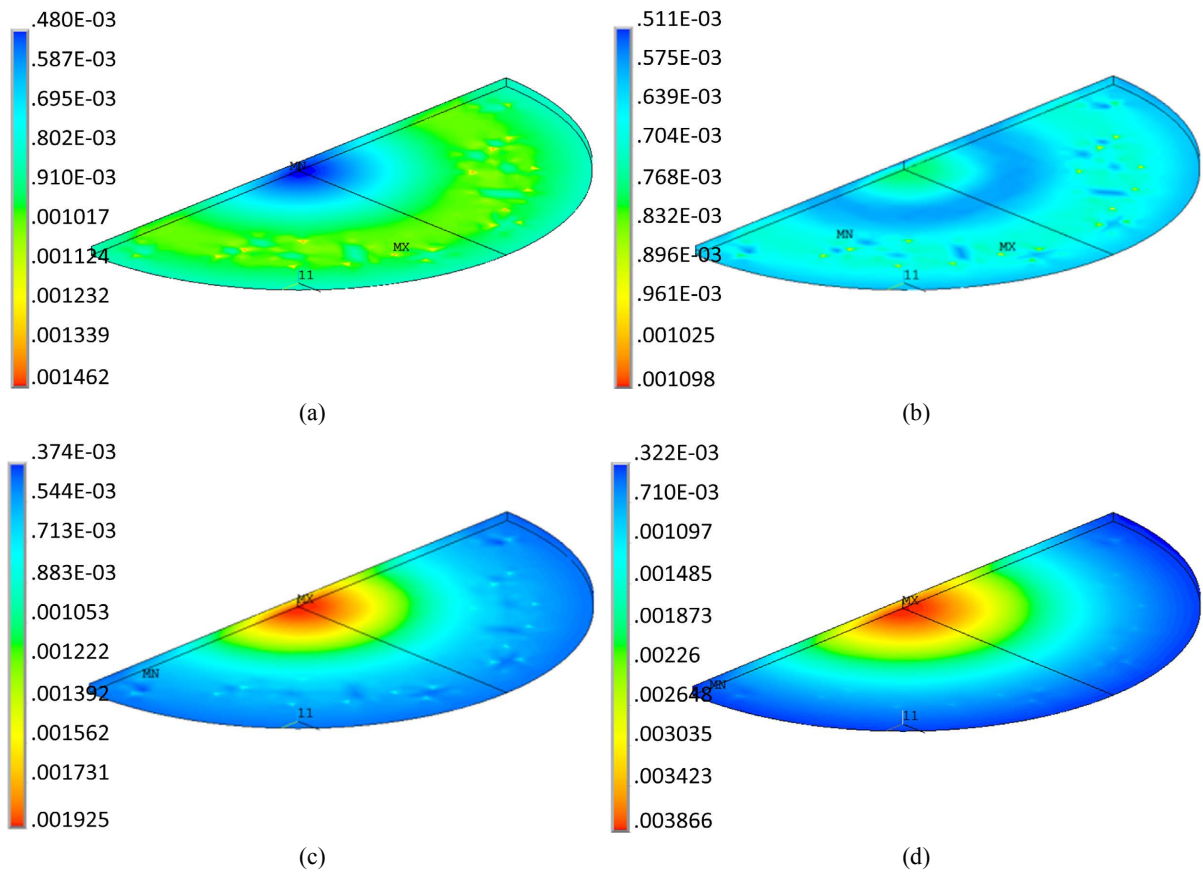
表 4. 不同安匝比下的台面漏磁

安匝比	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
台面漏磁/mT	1.462	1.098	1.925	3.039	3.866	4.705	5.467





**Figure 8.** Tabletop flux leakage under different ampere-turn ratios  
**图 8.** 不同安匝比下的台面漏磁



**Figure 9.** Magnetic flux distribution in the leakage flux plane (Unit: T), ampere-turn ratio: (a) 0.6; (b) 0.7; (c) 0.8; (d) 1.0  
**图 9.** 漏磁平面的磁通分布(单位: T), 安匝比: (a) 0.6; (b) 0.7; (c) 0.8; (d) 1.0

### 3.3.3. 原因分析

电动振动台气隙磁通在上下励磁安匝比为 1 时最大, 台面漏磁在安匝比为 0.7 时最小。通过研究不同励磁安匝比下台体的磁通分布, 来解释产生上述现象的原因。图 10 为励磁安匝比为 0.6、0.7、1.0、1.2

时, 台体的磁通分布, 图 11 为励磁安匝比为 0.6、0.7、1.0、1.2 时, 台体的磁感线分布。结果表明: 当台体上下励磁安匝比为 1 时, 台体的磁感线为典型的双涡形; 当增大或减小上下励磁安匝比, 磁感线密度则在上励磁或下励磁周围增大。

可以进行如下解释: 上励磁产生的磁场部分经过气隙, 部分经过下极板构成回路; 下励磁产生的磁场则部分经过气隙, 部分经过上极板和上铁芯构成回路。上下励磁产生的磁场在气隙发生叠加, 在上极板和上铁芯互相抵消。当安匝比为 0.7 时, 上下励磁产生的磁场会在上极板和铁芯处彼此抵消, 降低了此处的磁感线密度, 故而减少了台面漏磁。当安匝比偏离 1 时, 由于会增大台面局部磁路的磁通密度, 从而导致磁阻增大, 故而减小了气隙磁通。

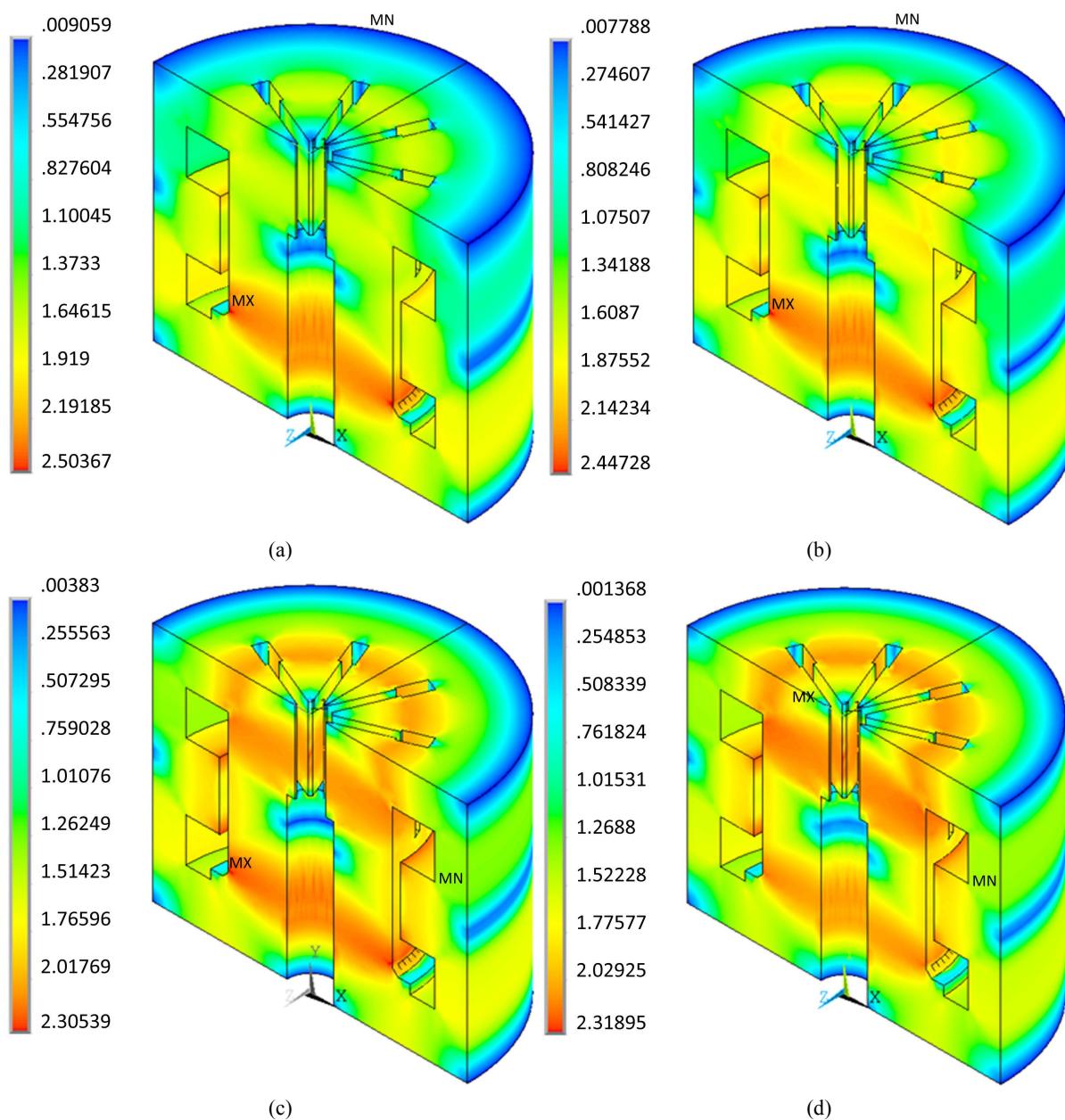
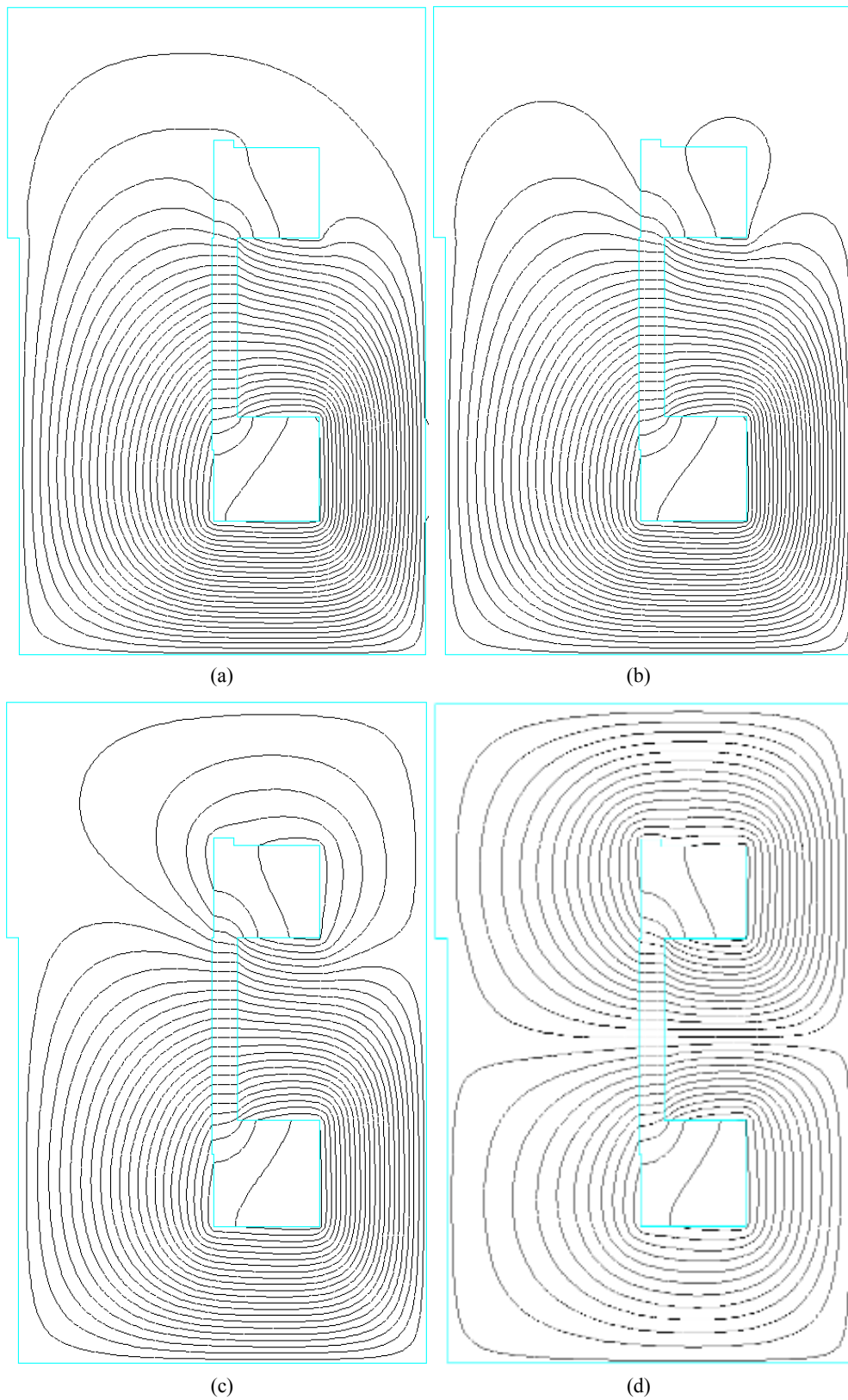


Figure 10. Magnetic flux density distribution, ampere-turn ratio: (a) 0.6; (b) 0.7; (c) 1.0; (d) 1.2

图 10. 台体磁通密度分布, 安匝比: (a) 0.6; (b) 0.7; (c) 1.0; (d) 1.2





**Figure 11.** The distribution of magnetic field lines, ampere-turn ratio: (a) 0.6; (b) 0.7; (c) 1.0; (d) 1.2  
**图 11.** 台体磁感线分布, 安匝比: (a) 0.6; (b) 0.7; (c) 1.0; (d) 1.2

## 4. 结论

对比电动振动台在不同上下励磁安匝比下的磁路仿真计算结果, 得到以下结论:

1) 气隙磁通密度在上下励磁安匝比为 1 时最大, 并且安匝比在 0.8~1.2 之间可保持高位; 安匝比远离 1, 气隙的磁通密度会显著下降。整体上看, 气隙中的磁通分布均匀, 磁场方向与气隙垂直。

2) 适当减小上励磁安匝数可以减小台面漏磁, 其原因是: 上下励磁产生的磁场在上极板和上铁芯处彼此抵消, 降低了该处的磁感线密度, 从而减小了台面漏磁。

3) 气隙磁通和台面漏磁是电动振动台的两个重要性能指标。振动台磁路设计时, 可以考虑通过改变上下励磁安匝比的方法, 使得漏磁降至最低, 同时保证有较大的气隙磁通。

## 参考文献

- [1] GB/T 13310-2007 电动振动台[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [2] 奚德昌. 电动振动台的磁路计算[J]. 工程与试验, 1976(4): 1-20.
- [3] 秦亚明, 张巧寿. 永磁振动台磁路计算与仿真[J]. 强度与环境, 2009, 36(6): 55-61.
- [4] 齐晓东. 表贴式永磁同步轮毂电机磁场分析与优化设计[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [5] 唐烈峥, 阮江军, 丁衡宇, 等. 变频供电异步电机端部绕组磁场分析[J]. 微电机, 2019, 52(12): 13-17.
- [6] 王洋. 线圈耦合器轴向磁场分析[J]. 仪表技术, 2020(4): 14-16.
- [7] 胡金杭, 曹磊, 杨波, 杨军. 绝缘磁芯变压器漏磁计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016(2): 47-50.
- [8] 兵器工业无损检测人员技术资格鉴定考核委员会. 常用钢材磁特性曲线速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.