

# 基于 JMAG 的单相无刷直流电机的有限元分析

## Finite Element Analysis of Single-phase Brushless DC Motor Based on JMAG

蒋丽萍 杨凯 冯垚径

(华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

**摘要：**本论文从电机的结构特点和基本原理出发，利用 JMAG 软件对电机的径向气隙磁密、绕组电感、反电动势以及磁阻转矩等重要参数和性能指标进行分析。通过对空载和负载时的相应波形比较，得出电枢反应现象的存在，其结论与理论分析相符，且本论文也为该电机控制器的研究打下了基础。

**关键词：**单相无刷直流电机；JMAG；有限元分析；参数计算

**Abstract:** Based on the motor structure and operating principle, the radial airgap flux density, the induction, the EMF and the reluctance torque are calculated in this paper. The conclusions of armature reaction phenomena quite match with the theoretical analyses by means of the comparison of no-load and load corresponding waveform, and this paper also lay a foundation for the research of this motor controller.

**Key words:** Single-phase Brushless DC Motor, JMAG, finite element analysis, parameter calculation

### 1引言

单相无刷直流电机无需任何控制装置可实现自起动，在结构上比三相无刷直流电机简单；与同容量的单相异步电动机相比，其效率较高；本电机采用外转子结构可实现直驱，无需传动结构，且定子嵌线比较方便，节省铜线等优点，在家用电器领域中有广阔的应用前景。国外知名电机公司对该电机的设计和控制技术较先进，而国内对这种电机了解甚少，研究工作几乎没什么进展，故本论文的研究不仅具有理论价值，也有实际意义。

JMAG-Studio 是由日本综合研究所(JRI)开发的功能齐全，应用广泛的电磁场分析软件。与常见的 Ansoft、Ansys 电磁分析软件相比，其优点：统一清晰的操作界面，使操作简单；灵活、多样的材料数据库；简单、高效的网格剖分；强大的耦合计算能力，且提供与专业电路仿真软件接口，为电机仿真构建了一个最为完善的物理模型。总之，软件可以对各种电机及电磁设备进行精确的电磁场分析，提供设计上的帮助和降低产品的开发周期。

本论文从电机的结构特点和基本原理出发,利用 JMAG 软件对电机的径向气隙磁密、绕组电感、反电动势以及磁阻转矩等重要参数和性能指标进行详细分析和计算,通过对空载和负载时的相应波形比较,得出电枢反应现象的存在,其结论与理论分析相符,也为该电机控制器的研究打下基础。

## 2 单相无刷直流电机结构及工作原理

定子电枢铁芯设计为 6 齿,且齿的外形设计为不对称的特殊形状,此处采用不对称气隙,主要是使电机具有自起动功能。若采用对称气隙,则断电时转子在定位转矩的作用下停在磁阻最小的位置上。此时永磁体的 NS 轴线与定子绕组轴线相重合,定子通电后所形成的磁场  $B_s$  与永磁体磁场  $B_r$  之间的夹角为  $0$ ,所形成的起动转矩  $T = B_r B_s \sin = 0$ ,电机不能起动。而当采用不对称气隙,则转子将停在与定子绕组轴线成  $\alpha$  角处如图 1 所示。于是电机通电后,定、转子磁场间的夹角为  $\alpha$ ,作用在转子上的力矩  $T \neq 0$ ,即电机在接通电源后可直接自行起动。

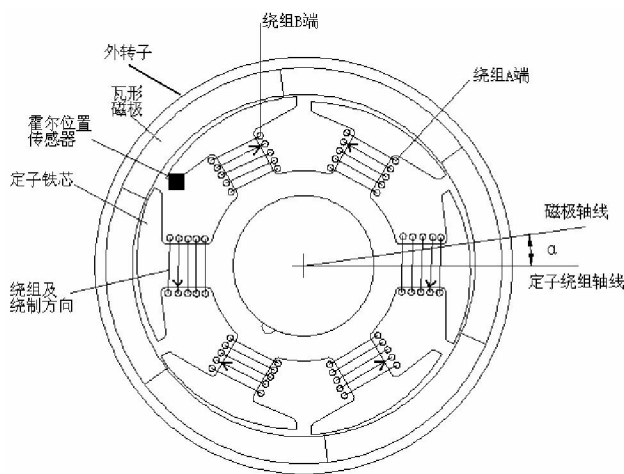


图1 电机结构示意图

本电机是一种外转子结构的电机,6个(3对)径向瓦形磁极采用粘结铁氧体,N极和S极间隔分布,对称粘结在外转子内圆上。在铁芯某一齿边缘的适当位置安放一个霍尔位置传感器,来感应电机外转子相对于定子的位置,该位置通过逻辑电路转换为控制型号,控制逆变器的4个开关管每  $180^\circ$  电角度进行换相,从而使电机连续旋转。

电枢绕组直接绕制在定子齿上串联构成一相(实际是一根导线绕制而成),为确保在同一个槽中的电流方向相同,相邻两绕组线圈的绕制方向应相反,即第1个绕组顺时针绕制时,第2个绕组应逆时针绕制,第3个再是顺时针绕制,依次下去至第6个绕组逆时针绕制,如图2所示。

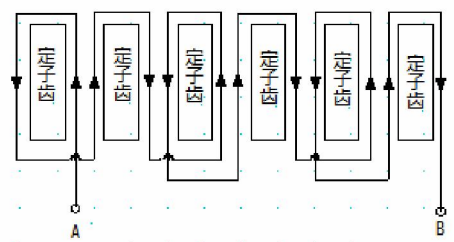


图2 电枢绕组的绕制方向

## 3 分析步骤

有限元分析步骤包括选择分析类型、建模、材料属性定义及给各面赋予材料属性、设定运动条件、建构电路、细分网格、求解及后处理等过程。

### 3.1 建立电机模型

本文采用的电磁场有限元分析方法建立在直角坐标系统中，其中 Z 坐标沿电机轴向，即垂直于平面方向，XY 坐标平面对应电机定、转子横截面。为方便分析，模型建立过程中作出如下假设：

1. 不考虑 Z 轴方向磁场的变化，把三维计算问题简化到二维坐标系统中进行。

2. 由于气隙及永磁体的磁导率要远远小于定子铁芯的磁导率，认为磁势全部消耗在气隙和永磁体中，定子铁芯区域的磁导率设为无穷大。

新建模型时，设置分析类型为瞬态分析，以及仿真模型为全模型。由于 JMAG 可提供 DXF 格式的模型直接导入，舍去在 JMAG 软件内模型的绘制，将电机的 DXF 模型导入得到如下模型，如图 3 所示。

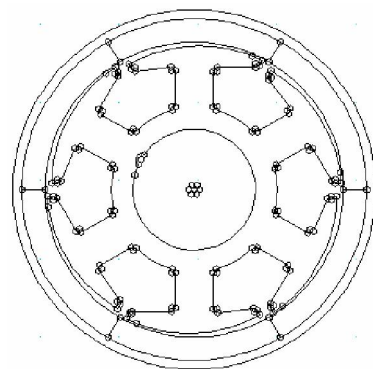


图3 DXF 导入的JMAG 模型

从图中可以看出，在圆心附近围绕着其他六个圆心，分别为构成非均匀气隙的六个齿所对应的圆心，所以此处采用的是渐变式的非均匀气隙，而对应电机的初始位置无法直接得出，需根据有限元分析波形得出，其计算方法和结果将在后面给出。

### 3.2 设置材料属性和运动条件

JMAG 包含七种类型的材料：(1)空气(默认)，(2)线圈 (3)非磁性材料(通过设置电阻率或者电导率考虑涡流效应)，(4)各向同性电工钢材料，(5)永磁体(可自定义退磁曲线)，(6)各向同性电工钢叠片(可设置叠层、叠装方向以及叠片系数，也可自定义曲线库)，(7)各向异性电工钢叠片。

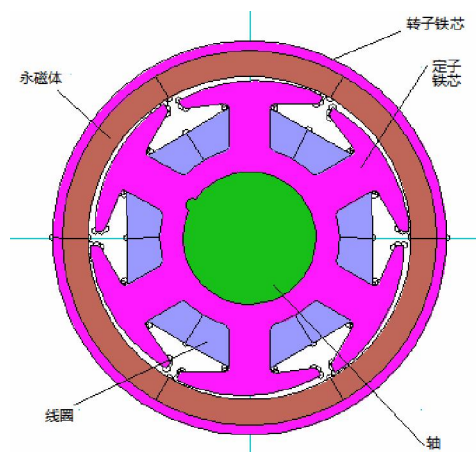


图4 赋完材料和运动条件的电机模型

对于电机的运动设置，可利用 JMAG 软件窗口中的 conditions- Creat Condition (或 Modify Conditions)，对硅钢片的厚度、线圈的匝数和电阻、转速、转矩和分析步长进行设置。图 4 给出了赋完材料属性和运动条件的电机模型，从图中可以看出不同材料属性的区域用不同颜色标出，属性相同的材料用同一颜色，便于识别。

为了分析空载与负载特性，需要对绕组进行排布和分相，加载电流激励源时可利用 JMAG 自带的电路设置窗口，放置一 FEM Coil 代表电机的单相绕组，双击该元件，可设置线圈的匝数和电阻，使用比较方便，其空载电路和负载电路如图 5(a)、(b)所示。

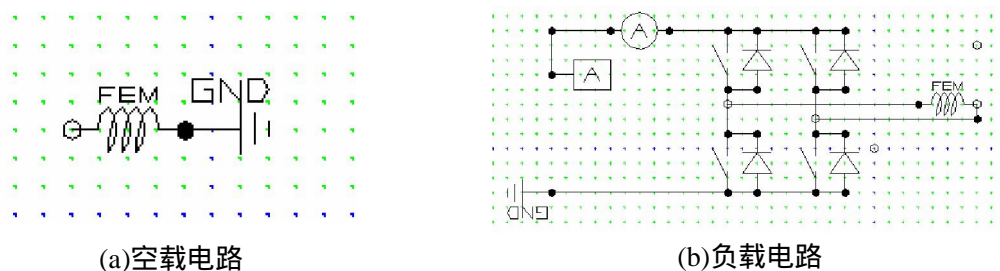


图 5 JMag 的绕组电路

根据单相无刷直流电机的工作原理，FEM 线圈要通入电角度为  $180^\circ$  的正负交替的电流，在图 5(b)中，FEM 线圈的电流由一直流电流源供给，逆变器的换相逻辑状态通过设置开关管的开关状态获得。

由于 JMag 是专用于电机分析的软件，所以无需特意设置求解区域，软件可根据材料属性自动设置求解区域。

### 3.3 网格剖分

采用自适应方法生成网格细分电机模型，不需设置任何网格参数，完全自动进行。对于气隙网格，JMag 自动根据圆周分段数发生网格，并且计算时采用气隙网格滑移。本例采用自适应方法生成网格，但规定了细分的最大值，得到细分后的局部模型如图 6 所示。

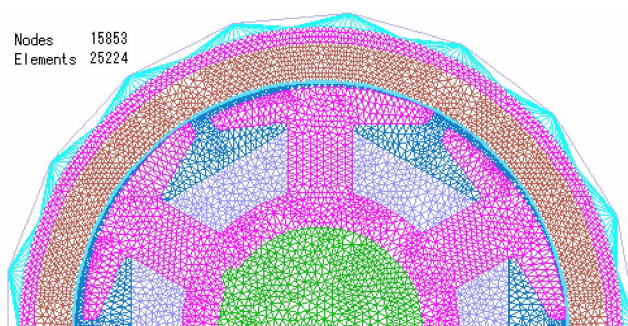


图6 JMag细分后的模型

## 4 运行及后结果分析

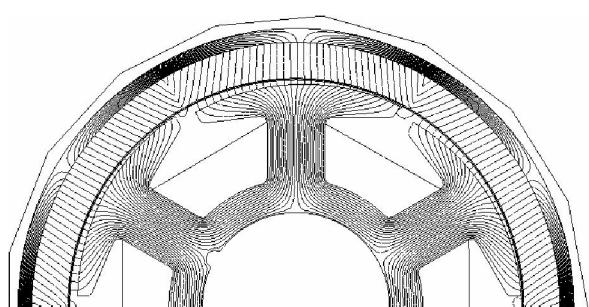
当以上 3 步设置完成时，可进行运行分析，若出现错误，JMag 会给出详细的说明，据此进行错误分析并纠正，直到无错误时才能顺利进行，最后自动保存为\*.plot 的文件，该文件可单独打开也可与电机模型窗口、电路窗口同时显示。

1

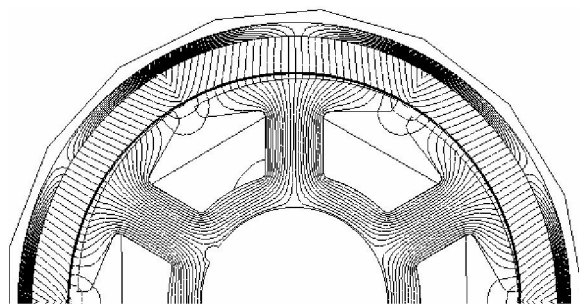
本文分别做了两次有限元分析，一次为电流有效值为 0A，即电机空载；一次为电流有效值为 2.2A，即电机负载，其所对应的电路如图 5(a)、(b)所示。

### 4.1 磁力线分布

图 7 为电机磁力线分布图。从空载和负载的磁力线分布可以得出，负载时的电枢反应使磁极下的磁力线扭斜，磁通密度分布不均匀，从而使合成磁场发生畸变。



(a)空载时电机磁力线分布

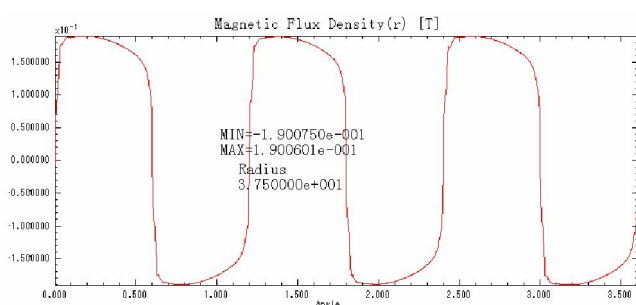


(b)负载时电机磁力线分布

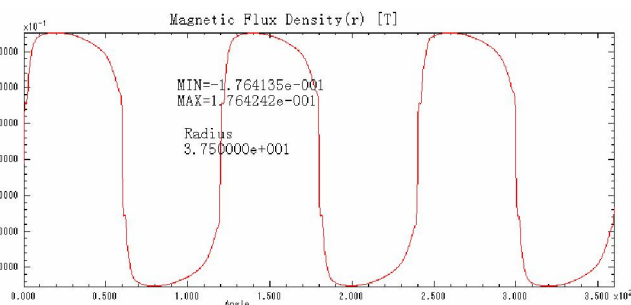
图7 电机的磁力线分布

## 4.2 气隙磁密

径向气隙磁密计算是对整个电机进行电磁分析和设计的基础，JMAG 软件可自动计算出电机的径向气隙磁密。图 8 所示是空载和负载时电机的气隙磁密波形。



(a)空载气隙磁密



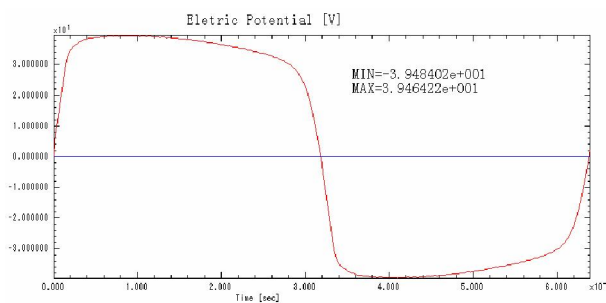
(b)负载气隙磁密

图8 电机气隙磁密波形

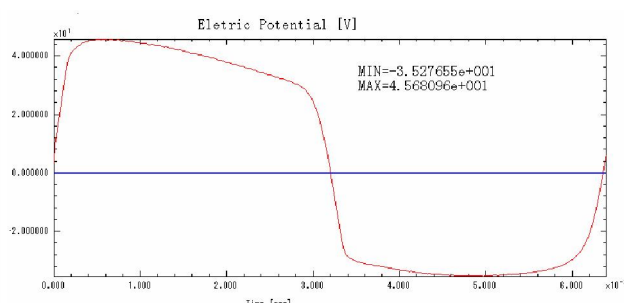
通过比较气隙磁密波形可以看出,每极下负载时的合成磁密与空载时的磁密分布几乎相同,但由于电机磁路处于非线性区域,增强的磁密小于减少的磁密,故负载时每极合成磁密比空载时的合成磁密要小。

## 4.3 感应电动势

电机空载和负载时的电机绕组感应电势如图 9 所示。



(a)空载感应电势



(b)负载感应电势

图9 电机绕组的感应电动势



从(a)图可以看出电机的空载反电势幅值约为 39.46V,其分布比较对称,而(b)图所对应的反电势波形左右并不对称,即证明了电枢反应存在,且负载时的感应电动势小于空载时的感应电动势。

### 4.3 电磁转矩

非均匀气隙的存在是单相无刷直流电机实现自起动的关键,但这种特殊结构使电机在运行过程中受到磁阻转矩的影响而产生转矩脉动,空载时该转矩即为电机的齿槽转矩,其波形如图 10(a)所示。

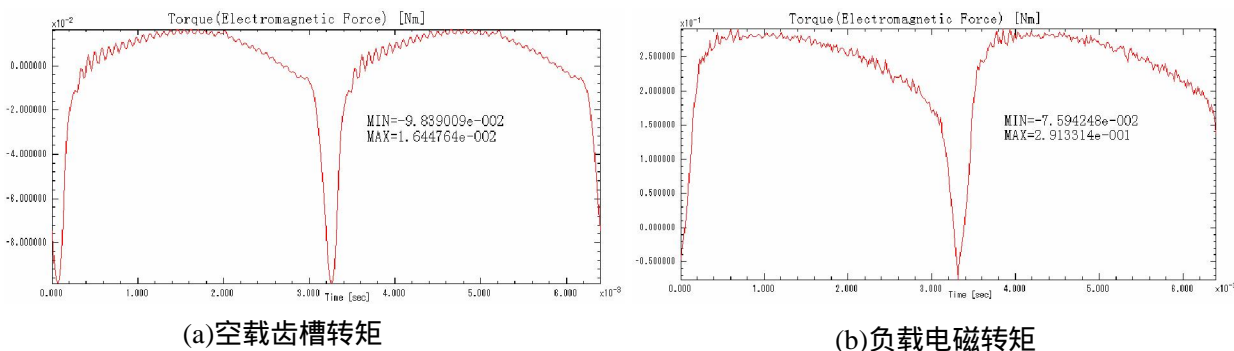


图 10 电磁转矩

另外,根据齿槽转矩可以确定电机的初始位置角,即齿槽转矩为 0 时,定子通电后所形成的磁场  $B_s$  与永磁体磁场  $B_r$  之间的夹角,从而使电机实现自起动功能。从图中可以得到,  $\theta = 7^\circ$ ,即为图 1 中所示的角。

负载时的电磁转矩如图(b)所示,由图可以看出其波动比较大,主要原因在于齿槽转矩的存在,其最大值为 0.29Nm。

## 5 参数计算

参数计算是进行电机分析的基础,也是设计电机控制仿真电路的必须数据,对于单相无刷直流电机来说,主要参数包括定子绕组电阻和电感参数。电阻可由欧姆定律直接算出,较易得到。

电感计算较麻烦,有两种方法:一种是磁路法,一种是有限元方法。由于该电机的特殊结构,磁路较复杂,磁路法分析电机内电磁场问题只能得到一些简化的局部解,故精度不高。有限元法充分考虑了电机结构以及铁芯饱和,计算精确,算法统一。

进行有限元分析,需将电机的永磁体设为空气材料或者将其去除,这将改变原电机已存在的模型,将仿真分析复杂化。而JMAG软件的电感计算功能非常强大,无需改变原设置电机模型中的永磁体材料,只需进行一次建模和剖分过程,点击JMAG studio 窗口中的Tools-Calculate Coil Inductance,即可快捷地完成电感的计算。对本电机的电感计算采用了三种计算方法,其值如表1所示。

表1 电机绕组电感的计算结果对比

测量方法	RLC 测试仪	Ansoft 软件	JMAG 软件
测量值(mH)	6.215	5.3454	5.673

JMAG 软件可以根据磁链计算结果计算线圈的自电感与互电感, 需要指出的是由于线圈端部存在漏磁通, 因此如果电机轴向厚度较短或者电流较大, 致使磁密饱和时, 二维模型的计算误差会增大, 但相对比与 Ansoft 软件来说, JMAG 软件的计算值更接近于实测值。

## 6 总结

通过上面对单相无刷直流电机分析过程的介绍, 可以看出利用 JMAG 软件能简单、快速地分析电机在不同工况下的磁场分布情况, 获得各种性能参数曲线与数据, 这对电机设计过程极其有利。通过这些直观的有限元分析结果, 电机设计人员可以辨别设计方案的优良性, 缩短产品开发周期, 同时也为电机控制器的仿真分析提供了必要的参数, 例如电感和齿槽转矩等参数, 为电机控制的精确仿真奠定了基础。

## 7 参考文献

- [1]戴白刃. 新型外转子永磁电机的研制. 常州信息职业技术学院学报, 2007,6(3):21-24
- [2]王振, 刘建国, 王爱凤. 基于 ANSOFT 的永磁同步电机有限元分析. 能源研究与管理, 2010(3):26-29