

# 基于 JMAG-Studio 的高速 SRM 参数优化设计

## Optimization Design of High-speed SRM Parameters Based on JMAG-Studio

裴丽娜<sup>1</sup>, 毕大强<sup>2</sup>, 葛宝明<sup>1</sup>, 孙东森<sup>1</sup>

(1 北京交通大学, 电气工程学院, 北京 100044 2 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:** 本文简单介绍了电磁场有限元分析软件 JMAG-Studio 的基本功能和特点, 并给出了一个高速 SRM 后期参数优化设计的实例。借助 JMAG 强大的电磁场分析功能, 对 SRM 建立瞬态场仿真模型。通过对 SRM 矩角特性和稳态性能的分析, 总结得到电机定、转子极弧、转轴长度、每相绕组串联匝数等参数的设计规律, 为 SRM 的后期参数优化设计提供了可靠的依据。

**关键词:** JMAG-Studio, 高速 SRM, 矩角特性, 稳态性能, 参数设计

**Abstract:** The basic principle and function characteristics of JMAG-Studio software of Finite-element Analysis in Electromagnetic Fields are introduced in this paper. An example of optimization design of high-speed SRM parameters is given. Based on the powerful function of electromagnetic field analysis of JMAG, transient field simulation model of SRM is established to analysis the torque-angle characteristics and Steady-state performance. Design rules of stator pole arc, rotor pole arc, shaft length and winding turns are summed-up finally. Reliable basis is provided for the parameter optimization of the late stage

**Key words:** JMAG-Studio, High-speed SRM, Torque-angle Characteristics, Steady-state Performance, Parameters Design

## 1. 引言

开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor, 简称 SRM) 结构简单坚固、可靠性高、容错能力强、调速性能优异, 非常适合应用于高速领域<sup>[1]</sup>。以开关磁阻电机为核心的开关磁阻电动机调速系统, 由于其结构简单、运行可靠、效率高等突出特点, 成为交流电机调速、直流电机调速和无刷直流电机调速系统强有力的竞争者, 引起各国学者和企业界的广泛关注<sup>[2]</sup>。SRM 为双凸极结构, 在实际运行过程中定、转子极身存在着显著的边缘效应和高度的局部饱和现象, 因此尽管它的机械结构简单, 但由于其磁场分析很复杂, 非线性及其严重, 使得 SRM 在电机本体设计、分析以及控制参数的优化方面存在许多技术难题。

JMAG 是由株式会社日本总研 (JRI) 开发的功能齐全, 应用广泛的电磁场分析软件。JMAG 采用有限元分析技术, 可以为各种电动机、发电机、电磁传动机构、电路元件、天线等电子电器设备及部件的研制、开发提供强大的电磁场分析功能, 可以进行电磁场、热、振动、电路、运动、控制的耦合分析<sup>[3]</sup>。同时, JMAG 自带的电路设置窗口含有绝大部分的电路元件, 如电阻、电感、电容、电源、绕组、整流-逆变器、电刷等, 能够满足一般的驱动电路连接。如果需要考虑功率管损耗或者加载高级控制策略, 例如 PWM 调制、矢量控制等,

JMAG 提供与专业电路仿真软件 PSIM、SIMULINK、PSPICE 的接口，进行实时仿真。

本文给出了一个高速 SRM 后期参数优化设计的实例。由于 SRM 的高度非线性使得解析法建立非线性模型非常困难<sup>[3-4]</sup>，也无法用计算公式准确描述电机参数变化对电机性能的影响。为了分析 SRM 电机结构对 SRM 性能的影响，本文借助 JMAG 强大的电磁场分析功能，对 SRM 建立瞬态场仿真模型，通过对 SRM 矩角特性和稳态性能的分析，总结得到电机定、转子极弧、转轴长度、每相绕组串联匝数等参数的设计规律，为 SRM 的后期设计提供了可靠的依据。

## 2. 基于 JAMG-Studio 的高速 SRM 电机模型

JMAG 进行电磁场分析主要分为前处理、计算和后处理三个阶段<sup>[5]</sup>。前处理阶段主要包括建立有限元模型（电机本体模型和功率变换器外电路模型）、设定材料属性、边界条件、运动参数以及绕组连接方式。计算阶段主要是进行网格剖分，然后计算电机性能。网格剖分可分为手动剖分、自动剖分和自适应剖分，一般都采用后两种剖分方式。自动剖分相比自适应剖分，网格划分少，计算时间短，但计算精度较低。对于普通电机设计，自动剖分完全可以满足用户的要求。在后处理阶段，JMAG 软件可以将电磁场有限元模型中每一个单元的磁场数据提取出来供用户做相应的分析，也可以生成各种动画和视频，可以很直观的展示目标模型的各种状态。本案例采用二维瞬态场建立模型，利用电机磁场分布对称性和周期性设定边界条件，图 1 和图 2 分别为采用网格自动剖分和自适应剖分的对称转子 4/2 结构 SRM 有限元模型，后续讨论均以自动剖分模型为准。针对不同的计算要求搭建相应的外电路模型就可以进行相应的电磁场计算。

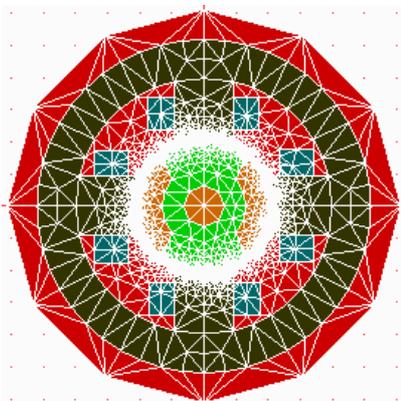


图 1 自动剖分电机模型

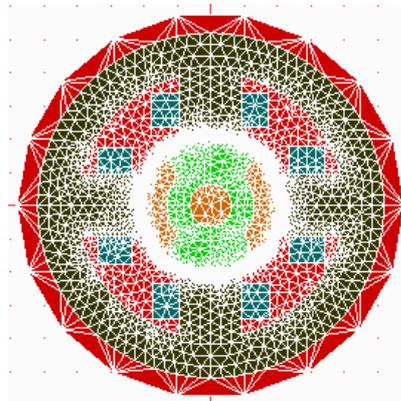


图 2 自适应剖分电机模型

## 3 电机参数优化设计分析

### 3.1 定子极弧

本案例所分析的 SRM 为 4/2 极电机，相比 6/4 和 6/2 结构，它结构简单，控制方便而且换流频率和铁心损耗都相对较低<sup>[6]</sup>，但是存在起动转矩小，转矩脉动大的问题<sup>[7-9]</sup>。通过对定、转子结构进行优化设计来改善电机起动性能，希望在不影响电机高速性能的前提下，增大起动转矩。由于 SRM 起动时，绕组电流可近似为矩形波，因此分析起动转矩最直接的方法

法就是分析它的矩角特性<sup>[1]</sup>。如图 3 所示为在 JMAG 软件中建立的矩角特性外电路图。仿真时采用的是在一项绕组通恒流源的同时改变转子位置，以此来绘制矩角特性曲线。本案例对电机定、转子进行齿形优化，就是通过计算不同电机模型的矩角特性来反应电机结构对电机起动性能的影响<sup>[10]</sup>。首先分析定子极弧对电机起动性能的影响，对电机的定子极弧系数做定量分析。选取转子极弧  $\beta_r = 79^\circ$ ，按照下表 1 建立三种定子极弧不同的电机 JMAG 仿真模型。

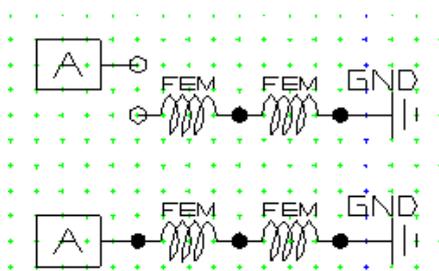


图 3 矩角特性外电路图

表 1 定子极弧变化表

电机	电机 1	电机 2	电机 3	电机 4
齿宽 (mm)	7.35	8.23	9.26	9.76
极弧(角度)	40	45	51	54

表 1 中 4 个电机模型的转子和电机各部分材料都一致，选取不同的定子极弧，定子极宽随着极弧的改变而改变。仿真电流为 8A，仿真结果的矩角特性曲线如图 4 所示。从图中可以看出，定子极弧对电机起动转矩有很大的影响，极弧越大，电机起动时，出力的角度区间越大。若不考虑窗口系数，增大定子极弧是改进 4/2 结构 SRM 起动特性的有效途径。在实际电机设计过程中，从绝缘和铜损方面考虑，电流密度要根据环境选取合适的值。如果定子极弧太大会减少槽面积，考虑到电机比较小，下线困难，槽满率不能太大。当然，定子极弧也不能太小，否则虽然增大了绕组空间但电机的利用率降低。

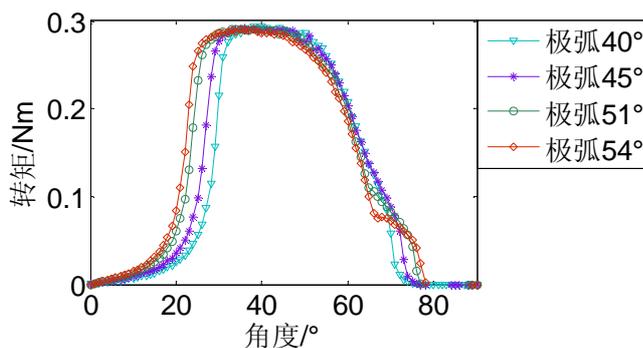


图 4 不同定子极弧下的电机矩角特性比较

另外，相同的定子极弧，给定子极加极靴可以使得电机窗口面积增加。加极靴前后，电机的矩角特性并没有改变多少，但降低了电机的过载能力。综合考虑电机性能，为了减小电密，适当加极靴还是合理的<sup>[11]</sup>。

为了综合分析电机结构对电机的影响，还需要分析各参数对电机稳态性能的影响<sup>[11]</sup>。在 JMAG 中搭建不同定子极弧结构的 4/2 极 SRM 模型，加外电压  $U_s=311$ ，开通角  $\theta_{on} = 0^\circ$ ，关断角  $\theta_{off} = 50^\circ$ 。定义转矩波动系数  $K_t$ <sup>[9]</sup>

$$K_t = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{av}} \quad (1)$$

图 5 和 6 分别为不同定子极弧下的电机输出电流和输出转矩对比图，从图中可以看出，

随着定子极弧的增大，输出电流峰值减小，输出转矩减小。从 JMAG 中采集数据，各电机输出波形的具体数值如表 2。

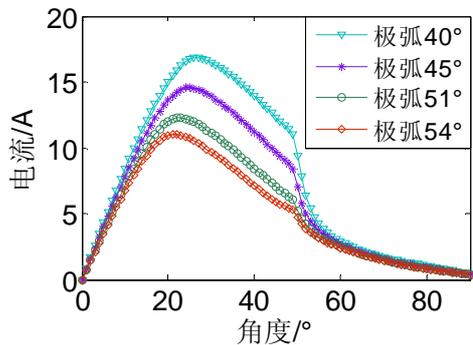


图 5 不同定子极弧下的电机输出电流对比

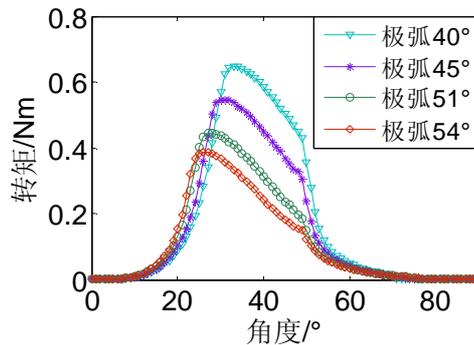


图 6 不同定子极弧下的电机输出转矩对比

表 2 不同定子极弧下的电机输出电流峰值、与转矩波动对比

参数	Tmax(Nm)	Tav(Nm)	Ki(Nm)	I <sub>max</sub> (Nm)
定子极弧 40°	0.648	0.175	3.70	16.84
定子极弧 45°	0.547	0.149	3.67	14.60
定子极弧 51°	0.445	0.123	3.62	12.30
定子极弧 54°	0.387	0.107	3.62	11.04

为方便看到定、转子极弧对电机转矩波动和峰值电流的影响，将各电流峰值的 1/4 取值与转矩波动系数画在同一坐标图中，如下图 7。从图 7 可以看出，随着定子极弧的增加，输出电流峰值减小，转矩脉动呈减小趋势，减小程度不大。综合前面定子极弧对电机起动性能的分析，在保证窗口面积足够的情况下，定子极弧越大越好。

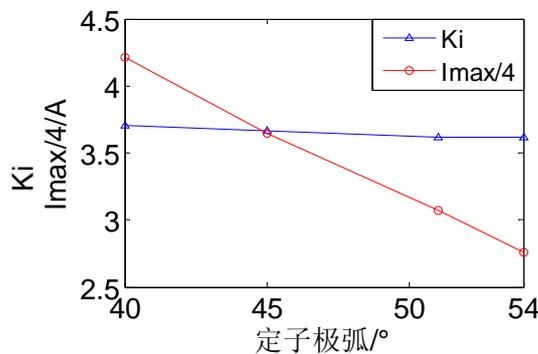


图 7 不同定子极弧下的电机

输出电流峰值、转矩脉动对比示意图

### 3.2 转子极弧

同理，为分析转子极弧改变对电机起动性能的影响，对电机的转子极弧做定量分析。极弧选取定子极弧  $\beta_s = 51^\circ$ ，按照表 3 建立三种转子极弧不同的电机 JMAG 仿真模型。

表 3 转子极弧变化表

电机	电机 1	电机 2	电机 3	电机 4
极弧(角度)	72	76	79	82

仿真电流为 8A，仿真结果的矩角特性曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出，增大转子齿宽可以将电机出力区提前，同时最小转矩略有下降，导致平均转矩几乎不变，如表 4 中数据所示。为了使电机在任何转子位置角都可以正常起动，即最小转矩越大越好，所以在设计电机转子极弧时，一般选取最小转矩较大的一种。从定量分析结果来看，改变转子齿宽对电机的起动性能影响并不大。

分别对四种转子极弧的电机模型在 JMAG 中仿真了不对齐和对齐位置的磁化曲线如图 9 所示，从图中可以看出，磁化曲线几乎完全重合，所以在通以相同的电流时，改变转子极弧对转矩影响不明显，这与前面矩角特性得出的结论一致。

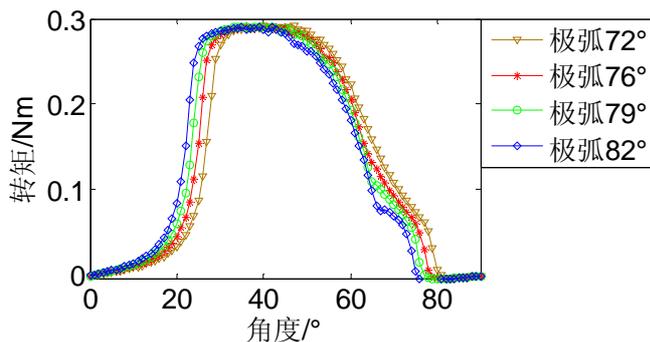


图 8 不同转子极弧下的电机矩角特性比较

表 4 不同转子极弧下的电机矩角特性平均转矩比较

转子极弧 $\beta_r$	72°	76°	79°	82°
平均转矩 $T_{av}$ (Nm)	0.133	0.132	0.133	0.132

将各电流峰值的 1/4 取值与转矩波动系数画在同一坐标图中，如图 10。从图 10 可以看出，随着转子极弧的增加，输出电流峰值减小，转矩脉动趋势不明显。在设计电机时，要根据实际情况考虑，选取合适的转子极弧。

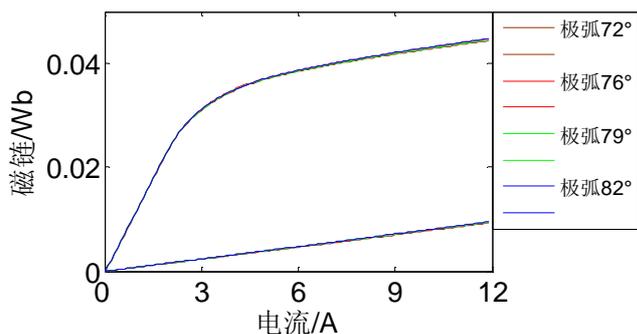


图 9 不同转子极弧下的电机磁化曲线对照

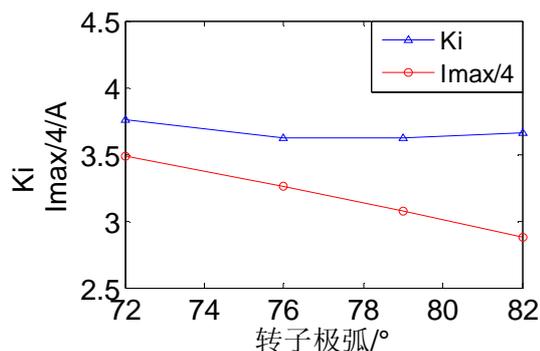


图 10 不同转子极弧下的电机输出电流、转矩对比示意图

### 3.3 其他参数

铁心长度和绕组匝数<sup>[11]</sup>越大，电机起动时出力越大<sup>[12]</sup>。在此具体分析铁心长度和绕组匝数对电机稳态性能的影响。另外，转子外径、定子内径受机壳容量的限制，一般都是以设计要求给出，所以一般不作为优化变量。气隙变化范围很小，在初始设计时基本可以确定，修改范围较小。

选取定子极弧  $\beta_s = 51^\circ$ ，转子极弧  $\beta_r = 79^\circ$ 。改变电机铁心长度，在 JMAG 中建立四种铁心长度的电机模型。同理，改变绕组匝数，建立另外四种电机模型进行仿真。从 JMAG 中导出各个模型输出电流峰值和转矩数据，得到铁心长度和绕组匝数分别对电机稳态性能的影响如图 11 和图 12。从图 11 中可以看出，虽然随着铁心长度的增加，峰值电流减小，但转矩波动增大。此外，增大电机铁心长度也会增大电机有效材料的用量和体积。因此设计电机时，铁心长度不可太长。从图 12 中可以看出，随着每相绕组匝数的增加，峰值电流减少，但转矩波动增大，因此绕组匝数也不可太大，需综合考虑。

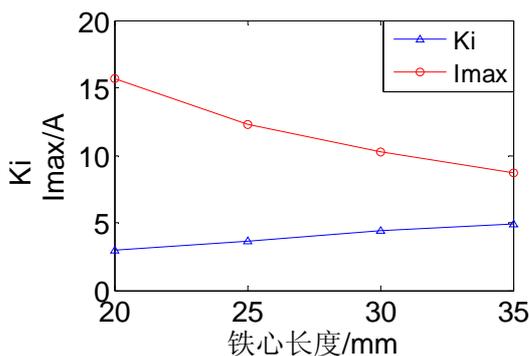


图 11 不同铁心长度下的电机  
输出电流、转矩脉动对比示意图

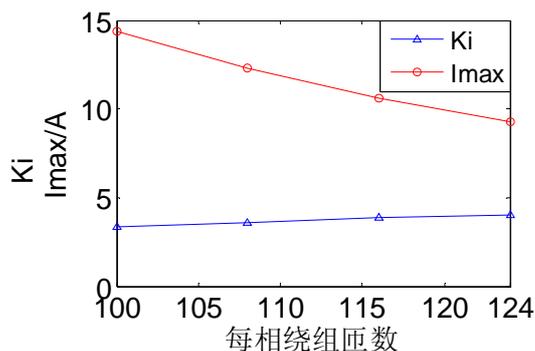


图 12 不同绕组匝数下的电机  
输出电流、转矩脉动对比示意图

## 4 结论

JMAG-Studio 是一款功能强大的电磁场分析软件，它可以对各种电机及电器设备进行精确的电磁场分析。本文给出了一个高速 SRM 后期参数优化设计的实例，在 JMAG 中对 SRM 起动性能和稳态性能进行了仿真，主要针对矩角特性、输出电流峰值和转矩脉动做深入分析，最后从 JMAG 计算结果中提取数据并做比较，总结得到电机定、转子极弧、转轴长度、每相绕组串联匝数等参数的设计规律。

## 5 参考文献

- [1] 孙健, 刘闯. 6/2 结构高速开关磁阻电机的研究与实现[D]. 南京 南京航空航天大学, 2007.
- [2] 孙晋伟, 边敦新, 开关磁阻电机设计方法及软件的研究[D]. 山东 山东理工大学, 2008.
- [3] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 詹琼华. 开关磁阻电机[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.
- [5] 周强, 朱学忠, 刘闯. 基于 JMAG-Studio 的开关磁阻电机场路直接耦合分析[J]. 2006 年 CDAJ 中国用户论文集.
- [6] 孙建忠, 白凤仙. 特种电机及其控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005
- [7] TJE Miller. Switched Reluctance Motors and Their Control[M]. Magna Publishing, 1993
- [8] Seok-Gyu Oh, R. Krishnan, Two Phase SRM With Flux Reversal Free Stator: Concept, Analysis, Design and Experimental Verification. 1155-1162, 1-4244-0365-0/06 (c)

2006 IEEE.

[9] I. E. Chabu, S. I. Nabeta, J. R. Cardoso, Design aspects of 4-2 pole-2 phase switched reluctance motors. 1999 IEEE. 63-65.

[10] 张慧英, 汪旭东, 高彩霞. 开关磁阻电机优化设计方法[J]. 重庆 重庆工学院学报

[11] 金星慧, 付光杰. 开关磁阻电机磁场有限元分析及稳态特定研究[D]. 大庆 大庆石油学院, 2005.

[12] 陈阳, 张海兵. 小功率少相数磁阻电机的研究[D]. 昆明. 昆明理工大学, 2006.