

基于 JMAG-Studio 的开关磁阻电机场路直接耦合分析

周强 朱学忠 刘闯

南京航空航天大学自动化学院航空电源重点实验室

基于 JMAG-Studio 的开关磁阻电机场路直接耦合分析

Direct Coupled Field-Circuit analysis of Switched Reluctance Motor based on JMAG-Studio

周强 朱学忠 刘闯

南京航空航天大学自动化学院航空电源重点实验室

摘 要: 本文介绍了电磁场有限元分析软件 JMAG-Studio 的基本原理和功能特点。基于 JMAG 软件强大的二维瞬态场分析功能和耦合分析功能,对开关磁阻电机进行直接场路耦合的二维瞬态场分析。该方法考虑了电机磁场饱和以及若干相同时激励时相间互感所带来的影响,提高了仿真精度。通过仿真和实验的对比,证明了该方法的正确性。

关键词: JMAG-Studio 开关磁阻电机 有限元分析 瞬态分析 场路耦合分析

Abstract: The basic principle and function characteristics of JMAG-Studio software of Finite-element Analysis in Electromagnetic Fields are introduced in this paper. Based on the powerful function of 2D transient analysis and coupled analysis of JMAG-Studio, A direct field-circuit coupled model combined with 2D transient analysis is presented to analysis the switched reluctance motors. Magnetic saturation of the motor and the effects of mutual coupling between motor phases could be considered in this method. The comparison and analysis of the numerical and measured results indicates the validity of the method proposed in this paper.

Keywords: JMAG-Studio, Switched Reluctance Motor, Finite Element Analysis, Transient Analysis, Coupled Field and Circuit analysis

1. 引言

开关磁阻电机(Switched reluctance motor,以下简称 SRM)是随着现代电力电子技术、控制技术以及数字计算机技术的发展在上世纪八十年代出现的一种新型调速电机。它具有结构简单,可靠性好、控制方式灵活、调速性能优越等许多优点,因此应用潜力巨大,可应用到工业生产的各个领域^[1]。但它也是一个非线性、时变、强电磁耦合的多变量系统,与功率变换器、控制器之间存在强耦合的关系,这给 SRM 以及整个系统的设计、分析和控制参数的优化带来很多困难。

SRM 的电磁特性可用反映电机相绕组磁链 ψ 、转子位置角 θ 和相绕组电流 i 三者之间关系的电机磁化曲线簇 $\psi = f(i, \theta)$ 来描述。根据绕组磁链的不同表述形式,描述 SRM 的数学模型可分为电参数法^[2]、磁参数法^[3-5]和场路耦合法^[6-9]等3种。其中电参数法和磁参数法算法简单、

运算量小,但二者对SRM非线性、复杂的相间耦合及磁场局部饱和难以准确模拟。为了获得精确的电机运行特性,建立SRM的磁场模型和功率电路模型,将电机磁场模型满足的非线性泊松方程与功率电路模型所满足的非线性电网络方程进行联立求解,并计及电机转子的运动,这就是场路耦合分析法。由于在SRM系统中,电机绕组的激励源为电压源,定子绕组的电流在瞬态仿真中是未知的,根据定子绕组电流的获得方法,场路耦合分析法一般分为两类^[10]。

一类为间接的场路耦合,其中包含两种方法,第一种方法先假设一个电流初值,据此计算磁场有限元方程组,求出定子绕组的等效电路集总元件参数,再求解电机等效电路方程,与电流初值比较,进行反复迭代求解。由于迭代法需要多次计算磁场有限元方程组,非常耗费时间,且收敛较慢。第二种方法是先对磁场模型进行静态有限元仿真,得到电机磁化曲线簇 $\psi = f(i, \theta)$ 。通过拟合和插值,根据绕组电流和转子位置确定电感或磁链关于电流或转子位置的变化率,进而根据电压平衡方程迭代计算绕组电流。该方法基于磁场静态分析,即用电机的若干个静止状态来拟合运动状态。同时为了满足一定的计算精度,静态场求解 $\psi = f(i, \theta)$ 需要较大的计算量,而且很难计及绕组相间互感的影响,在插值求解的过程中也会产生一定的误差。但目前大多数有限元软件的静态场分析较为完善,因此基于有限元的SRM仿真分析仍多采用这种方法^[6]。

另一类为场路直接耦合法^[7-9],它利用电压平衡方程中定子绕组感应电势与场量的关系,将绕组电流作为未知量与磁场有限元方程同时求解,这样虽然增加了总方程组的个数,但增加的仅是电路方程,比磁场有限元方程的个数要少的多,总的求解时间增加不多,常用于电压源激励的电机和变压器瞬态问题分析。该方法虽然克服了迭代法的缺点,求解时间短,也克服了静态场分析难以计及绕组相间互感影响的缺点,但需要强大的耦合分析和瞬态场分析功能的支持,而现有电磁场有限元仿真软件大多这两方面较为欠缺,文献[7-9]都是通过自编软件的方法来实现的,使得建模困难,限制了该方法的应用。

本文基于JMAG-Studio(以下简称JMAG)软件强大的耦合分析功能和瞬态场分析功能,对SRM建立直接场路耦合的瞬态场仿真模型。该模型考虑了若干相同时激励时的互感问题以及绕组电阻的影响,更符合SRM的实际工作状态。同时JMAG软件强大的后处理功能使我们可以方便直观地获得磁链、绕组电流、转矩、电磁力等各种参数,在此基础上进行电机结构和控制参数的优化,有利于对SRM的设计和分析。

2. JMAG 软件简介

JMAG 软件是电磁场分析的专业软件,采用有限元分析技术,可为各种电力发电机、电动机、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。该软件可实现静态场、瞬态场、谐波场和轴对称场的2D/3D分析。同时JMAG软件具有强大的耦合场分析功能,可进行电磁场和热、振动、电路、运动、控制的耦合分析。

该软件还支持与 Matlab/Simulink、PSIM 等第三方软件进行系统耦合仿真。

由于 JMAG 软件可以很方便的实现基于瞬态场的场路耦合分析，而且后处理功能强大，便于仿真数据的提取和分析。同时基于 JMAG 软件的各种耦合分析功能，可以较为方便的对 SRM 损耗、热、振动以及结构等研究热点和难点进行分析，因此特别适用于 SRM 等特种电机的分析与研究。

2.1 JMAG 软件的分析流程

图 1 即为 JMAG 软件进行电磁场分析的基本流程，可分为前处理、解算和后处理三个阶段。前处理阶段主要包括建立分析模型（电机磁场有限元模型和功率变换器电路模型）、设定材料属性、边界条件和仿真参数以及网格剖分等几个步骤。JMAG 软件应用 ICCG 法来实现对线性方程组的求解，而对于非线性方程组则采用 Newton-Raphson 算法进行求解，在保证仿真精度的前提下，提高了计算速度，可以近似地对各种问题进行快速收敛。借助网络，JMAG 软件可在多台计算机上并行运行（需要 License 的支持），提高计算速度以节省时间。在后处理阶段，JMAG 软件可以将电机磁场有限元模型中每一个单元或节点的磁场数据，以及电路模型中的电流、电压等数据提取出来，在 MS Excel 等软件中进行处理，也可以生成各种格式的动画和视频文件，可以很直观形象展示目标模型的各种状态。

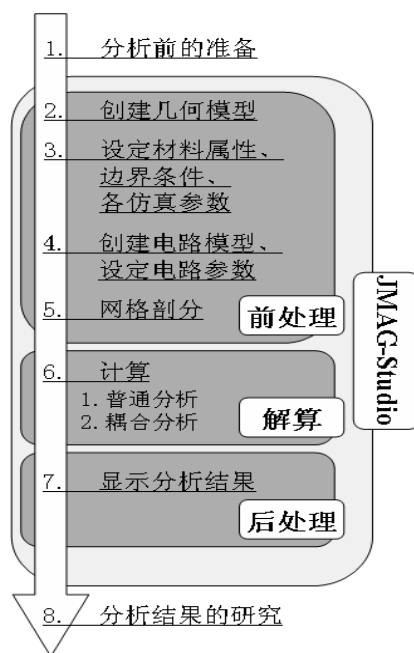


图 1 JMAG 软件分析流程

2.2 周期模型

在分析对称性模型时，可以利用电磁场的对称性建立周期模型，以到达减小计算量，节约计算时间，提高计算速度的目的。在 JMAG 软件中通过设定周期边界条件或非周期边界条件可以方便建立周期模型，如图 2。同时通过条件设定可以在后处理中自动将周期模型（包括磁场模型和电路模型）的计算结果进行全模型换算。

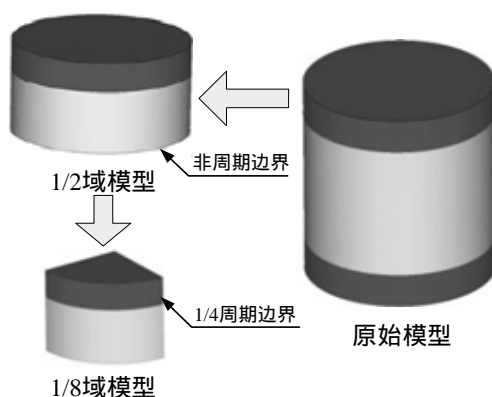


图 2 周期模型示意图

2.3 二维瞬态场气隙网格剖分

JMAG 软件的瞬态场分析功能强大,由于采用了先进的网格剖分技术使其在分析运动电磁场方面显示出优越性。在实际运用中,为简化分析模型,忽略绕组端部效应的影响,常采用二维场分析。在二维瞬态场分析中,与二维静态场分析不同,必须考虑场域内介质间的相对运动问题,如直线电机中动子相对于定子的平移,旋转电机中转子相对定子的转动。由于求解场域中含有运动的部分,因而在有限元场分析中需要不断改变网格剖分。如果气隙处的网格处理的不好,在数值计算过程中就容易引起解的不稳定,甚至会导致错误的结果。

JMAG 软件同其他的有限元分析软件一样可以提供网格软件自动剖分、手工剖分以及自适应剖分等常规的网格剖分功能。在关键的气隙网格的生成上, JMAG 软件采用了 Cylindrical Slide Plane 和 Patch Mesh Control 两种网格生成方法。Cylindrical Slide Plane 方法适用于旋转电机的气隙网格生成,即在电机的转子(运动部件)和定子(静止部件)之间的空气隙区域内生成网格,并产生一个滑移面,将生成的气隙网格分成运动和静止两部分,这两部分网格根据设定的运动条件在滑移面上进行网格滑移(仿真步长等于滑移面上网格长度)和网格变形(仿真步长不等于滑移面上网格长度),如图 3 所示。Patch Mesh Control 方法则是根据设定的运动条件,每步都自动对气隙网格进行重新剖分,适合运动条件复杂的瞬态场分析。

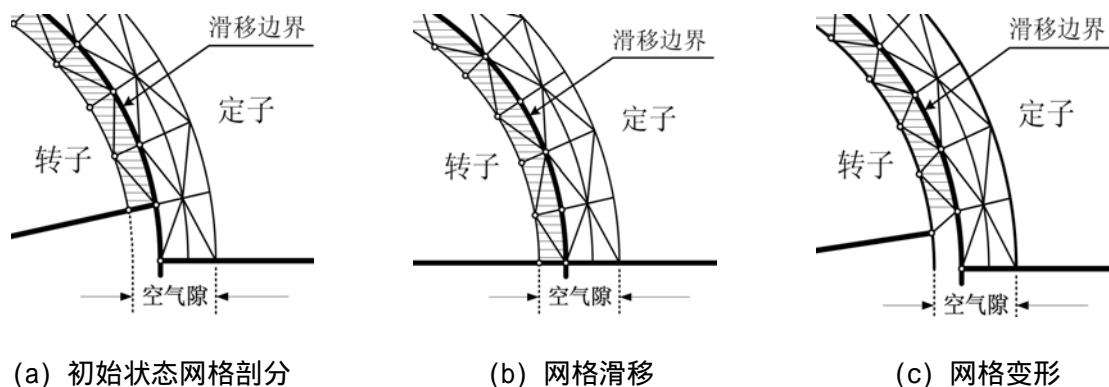


图 3 Cylindrical Slide Plane 气隙网格生成法

3. 应用实例

为进一步说明基于 JMAG 软件的 SRM 场路耦合分析, 通过对一台三相 12/8 结构的 SRM 进行场路耦合的瞬态仿真, 并与实验结果相对比, 说明基于 JMAG 软件的 SRM 场路耦合分析模型的正确性。

3.1 样机结构与参数

样机采用三相 12/8 结构, 定、转子铁心材料为 DW470, 功率变换器主电路采用不对称半桥结构, 每相 4 个线圈并联。样机主要参数见表 1。

表 1 转向臂的结点数和单元数

额定电压: DC270V	额定功率: 1.5kW	额定转速: 3200rpm
气隙长度: 0.3mm	定子叠厚: 140mm	定子极宽: 15°
定子铁心外径: 105mm	定子铁心内径: 62mm	转子铁心内径: 19mm

3.2 建立仿真模型

忽略电机端部效应, 本文采用 JMAG 软件提供的二维瞬态场分析模块, 利用电机的对称性, 建立样机的场路耦合分析的 1/4 域模型。根据电机磁场的分布, 该模型采用反周期边界, 如图 4 所示。其中图 4(a) 为剖分后的电磁场有限元分析模型, 图 4(b) 为样机功率主电路模型。设定样机运行于额定状态, 控制策略为角度控制, 其中开关管开通角为 -7° , 关断角为 13° 。

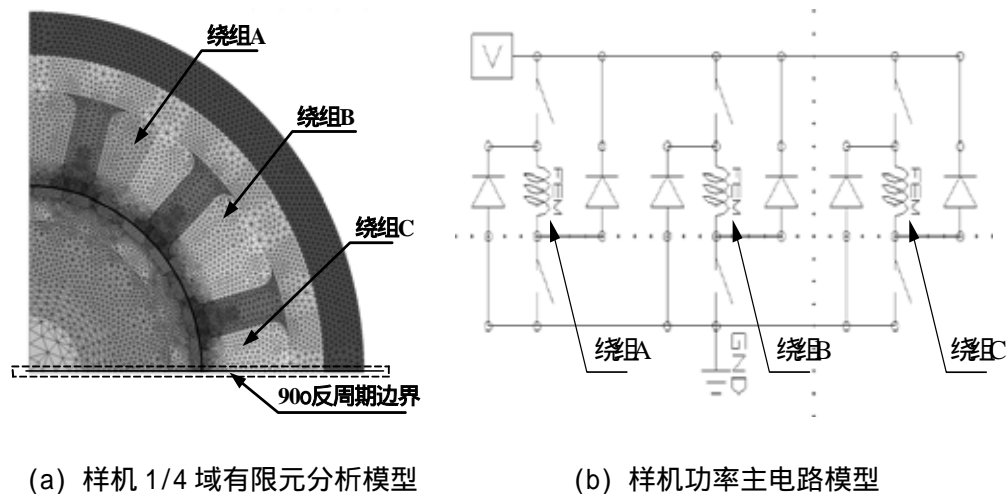


图 4 SRM 样机场路直接耦合分析模型

3.3 仿真结果与实验验证

对建立的分析模型进行求解, 计算完毕 JMAG 软件将自动生成一个结果文件, 该文件记录了场路耦合分析得到的所有数据, 经过后处理, 就可以得到磁通密度、相电流、电磁力、转矩等计算结果。同时该结果文件可作为损耗计算、温度场分析等后续计算的目标文件。

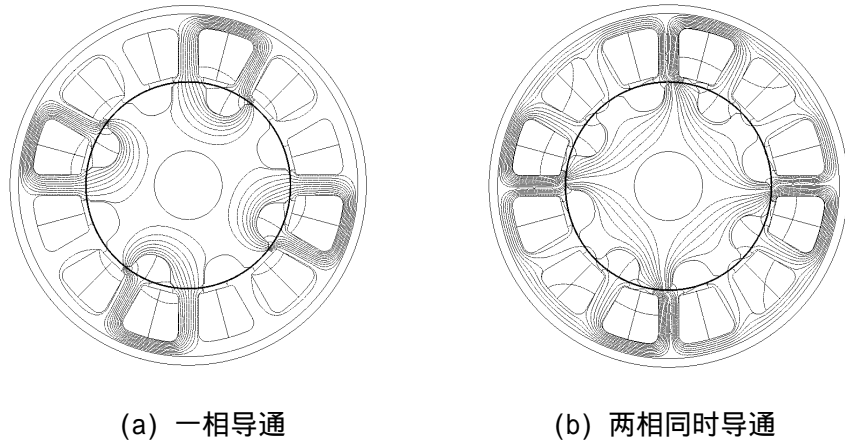


图5 SRM 磁场分布图

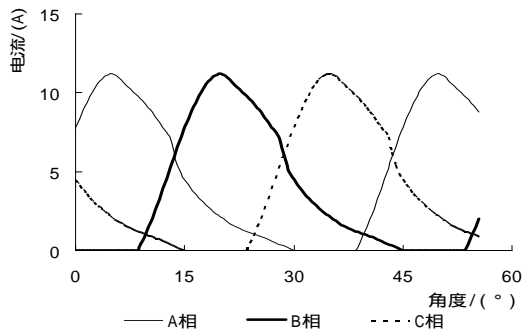


图6 相电流仿真波形

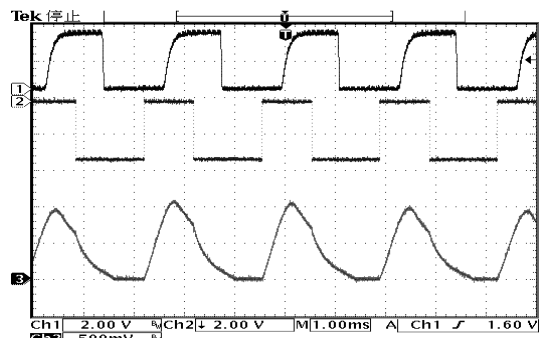


图7 相电流实验波形(Y:5A/div X:1ms/div)

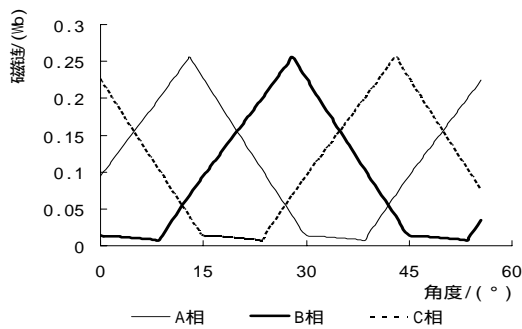


图8 相绕组磁链仿真波形

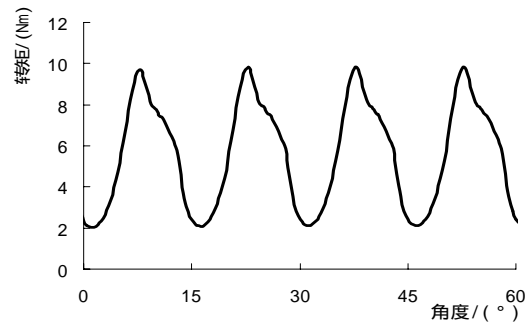


图9 三相合成转矩仿真波形

图5为电机磁场分布图,图6为三相电流波形图,图8为相绕组磁链波形图,图9为三相合成转矩波形图。对比仿真结果,进行了实验验证。图7为相同控制策略下,电机转速为3199转时实测的相电流波形,其中1通道为转子位置信号,2通道为驱动信号,3通道为相绕组电流。仿真结果和实测数据比较,相电流峰值分别为11.12A(仿真)和10.95A(实测),误差约为1.5%,说明了该方法具有较高的仿真精度。由于采用的是二维场分析,在建模时忽略了绕组端部电感,因此带来了误差,使得仿真值偏大。

4 . 结论

JMAG-Studio 是一款功能强大的有限元分析软件,特别是在旋转机械的电磁场分析领域,对各种运动问题和瞬态问题的分析计算能力是其他有限元分析软件所难以比拟的。基于 JMAG 软件,可以很方便的对 SRM 建立场路直接耦合分析模型,建立的仿真模型更接近电机的实际工作状态,提高了仿真精度,为今后对 SRM 的分析研究提供了一种有效的分析方法。

利用 JMAG 强大的耦合分析功能,还可以对损耗、热以及振动等问题进行研究,对 SRM 振动、噪音等重难点问题的理论研究有很大参考价值。JMAG 软件特别适合开关磁阻电机这类具有非线性饱和磁路、非线性主电路及非线性控制策略特点的特种电机的电磁场有限元分析。

参考文献

- [1] 刘迪吉,张焕春等.开关磁阻调速电动机[M].北京:机械工业出版社,1994.
- [2] 詹琼华.开关磁阻电动机[M].武汉:华中理工大学出版社,1992.
- [3] Stephenson J M, Corda J. Computation of torque and current in doubly salient reluctance motors from nonlinear magnetization data [J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 1979, 126(5):393-396.
- [4] Stiebler M, Liu Ke. An analysis model of switched reluctance machines [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14 (4): 1100-1105.
- [5] 刘珊珊,赵争鸣,孟朔.开关磁阻电机的快速仿真非线性模型[J].清华大学学报(自然科学版),2002,42(9),1176-1179.
- [6] Preston T W, Reece A B J, Sangha P S. Analysis of switched reluctance drives by the finite element time-stepping method [C].Proceedings on the IEE Fifth International Conference on Electrical Machines and Drives, London, 1991, pp.106-113.
- [7] Long Ya Xu , Ruckstadter E. Direct modeling of switched reluctance machine by coupled field circuit method[J] . IEEE Transaction on Energy Conversion, 1995, 10 (3):446-454.
- [8] 常国强,詹琼华,边敦新.开关磁阻电机驱动系统场路直接耦合的数学模型[J].中国电机工程学报, 2001, 21(3),70-73.
- [9] DeXin Xie, Xiuke Yan, Yihuang Zhang. A Direct Field-Circuit-Motion Coupled Modeling of Switched Reluctance Motor [J]. IEEE Trans on Magnetics, 2004, 40(2), 573-576.
- [10] Leonard P J, Rodger D, Lai H C, et at. Coupling FE with power electronics and rotor dynamics of motors [J]. IEE Seminar: Current trends in the use of finite element (FE) electromechanical analysis and design. January 2000: 6/1-6/6.