

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.01.013

双绕组 BSRM 定子振动模态有限元分析

谭超,王宏华,陈凌

(河海大学能源与电气学院,江苏南京 211100)

摘要: 针对以往开关磁阻电动机(SRM)模态分析中,仅将绕组以附加质量归于定子铁心,但忽略其刚度影响的局限,基于 6/4 极结构的 SRM 三维物理模型,建立了计及绕组、散热筋和底座的 SRM 定子有限元模型,提出以弹簧来模拟绕组与定子铁心之间柔性连接的建模方法,SRM 试验样机的有限元模态计算结果验证了该建模方法的有效性。为了合理计及转矩绕组、悬浮绕组对双绕组无轴承开关磁阻电动机(BSRM)定子质量和刚度的影响,把通过添加弹簧来模拟柔性连接的建模方法推广应用于双绕组 BSRM 三维有限元模态分析。有限元计算结果表明,采用弹簧模拟绕组与铁心以及转矩绕组与悬浮绕组之间柔性连接是一种有效计及绕组影响的建模方法,具有工程实用价值。

关键词: 无轴承开关磁阻电机;定子振动;绕组;弹簧模拟柔性连接;有限元建模;模态分析

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)01-0090-05

Finite-element modal analysis of stator vibration for BSRM with double windings

TAN Chao, WANG Honghua, CHEN Ling

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In previous modal analysis of a switched reluctance motor (SRM), the windings were treated simply as an additional mass and the influence of the stiffness of windings was ignored. In order to overcome the limitations, a finite element model of an SRM stator, which takes windings, the radiation rib, and the base into account, was constructed based on a three-dimensional (3D) physical model of SRM with a 6/4-pole structure. A modeling method in which the springs were used to simulate the flexible connection between the windings and stator core is presented. The validity of the modeling method was proven through finite-element modal analysis results of the SRM prototype. In order to reasonably consider the influence of the torque winding and suspension winding on the mass and stiffness of the stator of a bearingless SRM (BSRM) with double windings, the modeling method in which the springs were used to simulate the flexible connection was applied in 3D finite-element modal analysis for a BSRM with double windings. The results show that the modeling method in which the springs were used to simulate the flexible connection between the windings and stator core and the flexible connection between the torque winding and suspension winding is an effective method, it can take the influence of double windings into account, and it has high engineering practical value.

Key words: bearingless switched reluctance motor; stator vibration; windings; using spring to simulate flexible connection; finite element modeling; modal analysis

开关磁阻电动机 (switched reluctance motors, SRM) 具有许多突出优点:结构简单坚固,容错能力强,可工作于极高转速,能适应高温等各种恶劣环境。然而 SRM 相较其他电机有较大的噪声和振动,限制了其推广

收稿日期: 2016-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(51477042)

作者简介: 谭超(1989—),女,重庆丰都人,博士研究生,主要从事无轴承开关磁阻电机定子振动控制技术研究。E-mail: TanChao913@126.com

和应用^[1-4]。另外,在高速运行过程中机械轴承与转子之间由于磨损加剧导致电机发热严重,从而降低了工作效率,难以满足电机向更高转速、更大功率发展的要求。因此无轴承开关磁阻电动机^[5-7](bearingless-SRM,BSRM)应运而生,BSRM 不仅充分发挥了 SRM 的高速适应性,而且还兼具磁悬浮电机无机械损耗等优点,发展前景广阔。但是,BSRM 作为一种特殊的 SRM,其振动和噪声问题同样限制了其应用领域,因此如何抑制 BSRM 的振动和噪声是目前亟待解决的问题。

研究表明:SRM 通电相定子极受脉动的径向磁拉力作用,使壳体结构的定子产生压缩形变而振动,构成其噪声的主要根源^[8]。当径向电磁力波频率与定子固有振动频率一致时产生共振,将会引起严重的振动和噪声。因此,在 BSRM 振动和噪声的研究中,计算与分析其定子固有频率及其模态具有重要作用。

机电类比法^[9-10]是一种可得到固有频率解析表达式的分析方法,但计算精度有限。近年来,有限元法^[11-15]由于其模态计算结果具有准确、直观等优点,被广泛应用于电机定子振动特性的研究中。文献[11]通过比较 SRM 二维有限元模型和三维有限元模型所获得的定子模态和其固有频率,系统分析了绕组以及端盖和安装方式对定子固有频率的影响。文献[12]基于 ANSYS 有限元软件分别对 SRM 定子二维和三维模型以及带线圈定子的三维模型进行模态分析,结果表明绕组线圈对定子的固有频率有影响。目前文献对 SRM 绕组处理方法的研究主要集中于将绕组以附加质量归于定子铁心,忽略其刚度影响。鉴于 BSRM 实际结构较为复杂,现有文献在对其模型进行模态分析时均作了较大简化,一般不计绕组的影响^[16-17],这固然给建模和计算带来方便,但也导致较大的计算误差。

笔者基于 6/4 极结构 SRM 三维物理模型,建立了计及绕组、散热筋和底座的 SRM 定子有限元模型,提出了以弹簧模拟绕组与定子铁心之间柔性连接的建模方法,SRM 样机的有限元模态计算结果验证了该方法的有效性,并将这种通过添加弹簧模拟柔性连接的方法推广应用于双绕组 BSRM 三维有限元模态分析中。有限元模态计算表明,计及转矩绕组和悬浮绕组的 BSRM 定子振动特性分析有较大意义。

1 SRM 定子振动特性的 3 维有限元分析

1.1 SRM 建模

以一台 0.75kW、三相 6/4 极的 SRM 实验样机为例,建立了计及绕组、散热筋和底座的 SRM 定子三维有限元模型,如图 1 所示。因为定子铁心与机壳内圆采用过盈配合,近似认为定子铁心与机壳完全刚性连接。

定子铁心、机壳和绕组的材料属性如表 1 所示。

表 1 电机各部分的材料属性
Table 1 Material properties of each part of motor

名 称	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
机壳	90	7 640	0.25
绕组	120	8 900	0.30
定子铁心	205	7 800	0.30

在实际 SRM 结构中,定子绕组套在定子极上并通过绝缘树脂紧固,定子绕组与定子铁心之间的连接并非刚性,绕组分别以附加质量和刚度影响定子振动系统。考虑到弹簧本身所具有的刚度和阻尼能够表征绕组与定子铁心之间的柔性连接,笔者提出了以弹簧来模拟绕组与铁心之间柔性连接的建模方法,即:选择绕组靠近定子极的一侧,采用弹簧连接定子齿极与绕组,通过设置弹簧的刚度和阻尼来计及绕组对定子振动系统的影响,如图 2 所示。

1.2 结果分析

基于有限元软件 ANSYS Workbench,对采用上述绕组建模方法的 SRM 定子模型进行自由振动模态分析。在自由振动下,三维有限元计算结果存在很多不同振型的模态,但由于电机的激振力一般均匀作用于磁极表面,因此真正有意义、对噪声有贡献的是轴向振动节点数为零的振型,即轴向无变形的振型^[8]。由于二阶椭圆振型是最应关注的振动模态,因此本文仅列出二阶椭圆振型

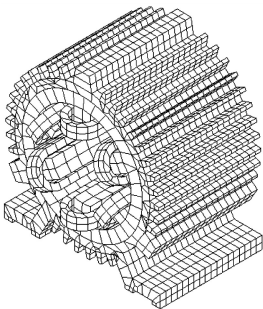


图 1 SRM 定子三维有限元计算模型
Fig. 1 3D finite element model for SRM stator

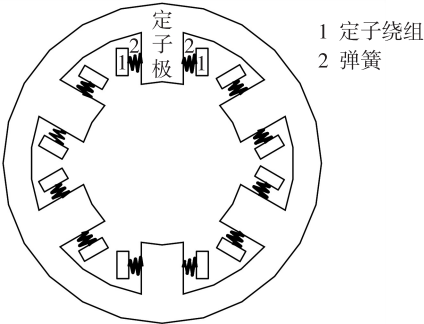


图 2 建模方法示意图
Fig. 2 Schematic diagram of modeling method

及其相应的固有频率。

模态计算结果表明,弹簧阻尼的取值对 SRM 定子固有频率影响较小,因此选取弹簧阻尼值为 $3\text{ N}\cdot\text{s}/\text{mm}$ 。在弹簧阻尼不变的情况下,当刚度取值处于 $1\times 10^5\sim 7\times 10^{17}\text{ N}/\text{mm}$ 之间时,均能获得 SRM 定子有效二阶椭圆振型,相应的固有频率相差无几。因此,本文选取弹簧刚度值为 $7\times 10^{17}\text{ N}/\text{mm}$ 的 SRM 定子模型进行自由振动模态分析。

SRM 定子在设定频率范围内的模态计算结果如图 3 所示。图 3 中,定子截面视图显示了轴向阶数为零的二阶振型。

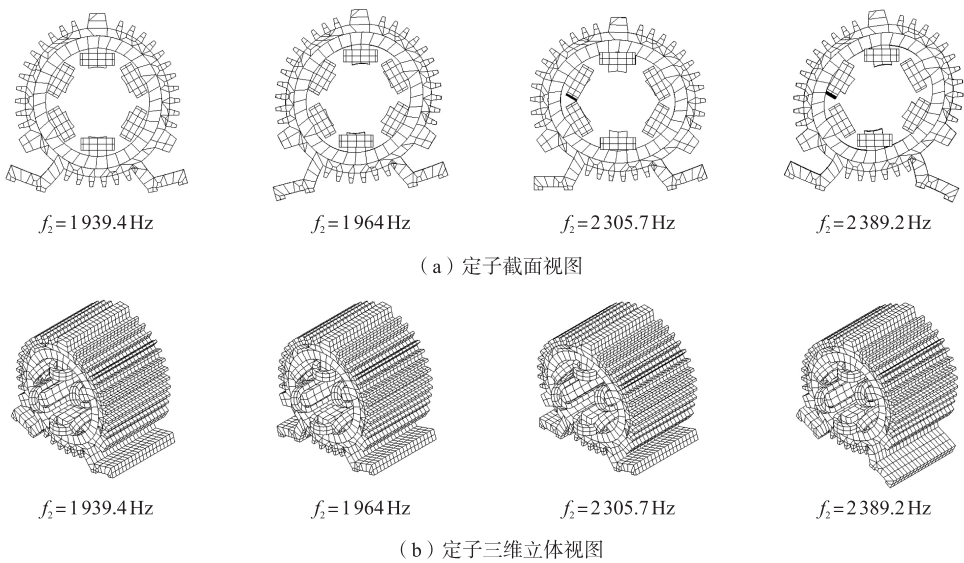


图 3 SRM 样机三维有限元分析获得的二阶模态

Fig. 3 Second-order modal shapes of SRM prototype obtained from 3D finite element analysis

将图 3 所示的三维有限元计算结果与文献[9]的样机模态试验结果相比,表明三维有限元计算二阶固有频率具有良好精度,本文提出的以弹簧模拟绕组与铁心之间柔性连接的建模方法是有效可行的。

2 BSRM 定子振动特性的三维有限元分析

2.1 BSRM 定子建模

双绕组 BSRM 定子极上绕有转矩绕组和悬浮绕组,绕组与定子极的连接并非刚性连接,而且转矩绕组和悬浮绕组之间也并非刚性连接,因此可将采用弹簧模拟绕组与铁心之间柔性连接的建模方法推广应用于双绕组 BSRM 三维有限元模态分析。

为合理计及转矩绕组、悬浮绕组对 BSRM 定子质量和刚度的影响,以 12/8 极 BSRM 为例^[16],建立了计及转矩绕组和悬浮绕组的 BSRM 定子三维有限元模型(图 4),其中,通过添加弹簧来连接绕组与定子铁心以及转矩绕组与悬浮绕组。BSRM 定子极上有 2 套绕组,分别是转矩绕组和悬浮绕组,如图 5 所示。

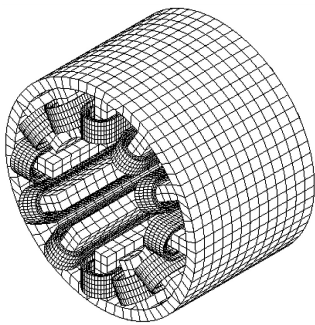


图 4 BSRM 定子三维有限元计算模型

Fig. 4 3D finite element model for BSRM stator

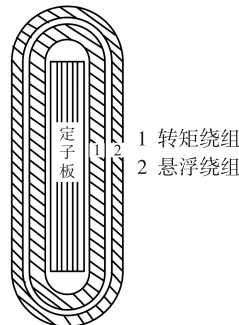


图 5 BSRM 定子绕组示意图

Fig. 5 Sketch of stator windings of BSRM

2.2 计算结果

采用有限元软件 ANSYS Workbench,对计及转矩绕组与悬浮绕组的 BSRM 定子模型进行自由振动模态分析。BSRM 定子在设计频率范围内的模态分析结果如图 6 所示。图 6 中,定子截面视图显示了轴向阶数为零的各阶振型。

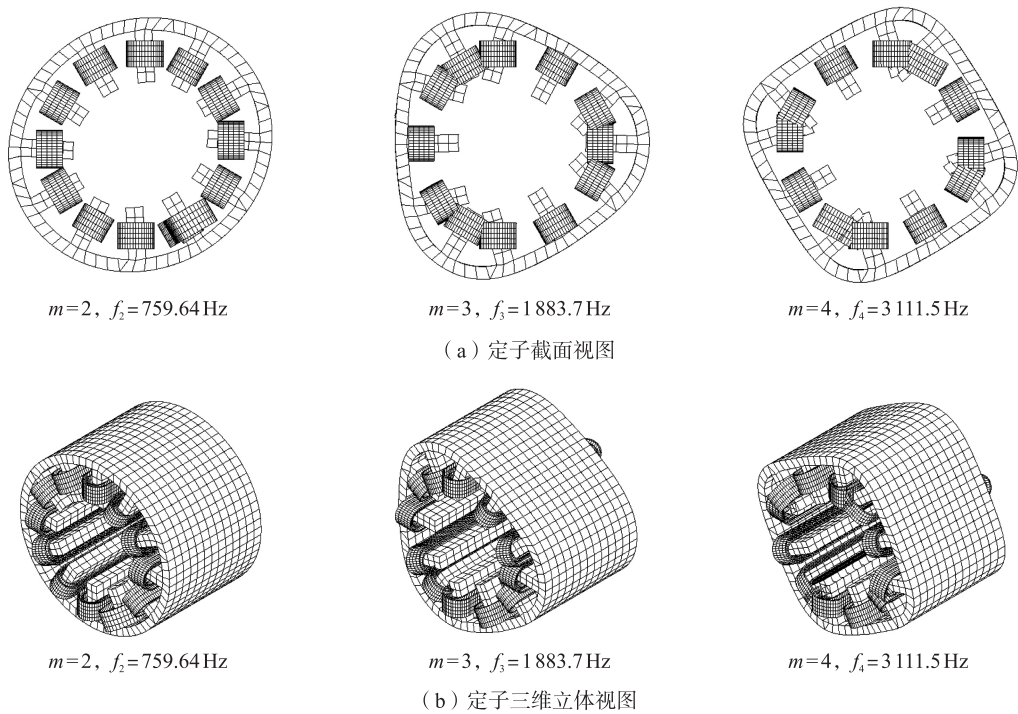


图 6 BSRM 三维有限元分析获得的模态

Fig. 6 Modal shapes of BSRM stator obtained from 3D finite element analysis

从图 6 可以看出,在绕组与定子铁心以及转矩绕组与悬浮绕组之间添加了弹簧之后,绕组与定子铁心不再是独立的部分,随着自由振动的进行,转矩绕组与悬浮绕组随着定子铁心一起运动,可获得清晰的振型,说明以添加弹簧的方式模拟绕组与定子铁心以及转矩绕组与悬浮绕组之间的柔性连接是合理的。

3 结 语

基于有限元软件 ANSYS Workbench 建立计及绕组的 SRM 定子模型,通过在定子绕组与定子铁心之间设置弹簧模拟部件间的柔性连接,获得了 SRM 定子模态参数。SRM 三维有限元模态计算结果验证了该建模方法的有效性。为了合理计及转矩绕组、悬浮绕组对 BSRM 定子质量和刚度的影响,这种添加弹簧模拟柔性连接的建模方法被推广应用于 BSRM 三维有限元模态分析中,其三维有限元模态计算结果表明该方法为提高 BSRM 定子计算模态分析的建模精度提供了新思路。

参考文献:

[1] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社,2006.

[2] 孙剑波,詹琼华. 一种利于开关磁阻电机降噪的新散热筋结构[J]. 电工技术学报,2005,20(9): 34-38. (SUN Jianbo, ZHAN Qionghua. A novel radiating rib structure of switched reluctance motor for low acoustic noise[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(9): 34-38. (in Chinese))

[3] GUO Xiaoqiang,ZHONG Rui,ZHAO Longpan,et al. Method for radial vibration modeling in switched reluctance motor[J]. IET Electric Power Applications,2016,10(9): 834-842.

[4] GAN Chun,WU Jianhua,SHEN Mengjie,et al. Investigation of skewing effects on the vibration reduction of three-phase switched reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2015,51(9): 503-507.

[5] 杨艳,邓智泉,曹鑫,等. 12/8 极无轴承开关磁阻电机定子振动特性分析[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(4): 494-500. (YANG Yan,DENG Zhiquan,CAO Xin,et al. Characteristic analysis of stator vibration for 12/8 bearingless switched reluctance

motors[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2010,42(4): 494-500. (in Chinese))

[6] 张计涛. 无轴承开关磁阻电机及其控制研究[D]. 北京: 北京交通大学,2012.

[7] YANG Yan,DENG Zhiqun,YANG Gang,et al. A control strategy for Bbearingless switched-reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(11): 2807-2819.

[8] CAMERON D E,LANG J H,UMANS S D. The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1992,28(6): 1250-1255.

[9] 王宏华,王治平,江泉. 开关型磁阻电动机固有频率解析计算[J]. 中国电机工程学报,2005,25(12): 133-137. (WANG Honghua,WANG Zhiping,JIANG Quan. Analytical calculating of natural frequencies of stators of switched reluctance motor based on electromechanical analogy method[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering,2005,25(12): 133-137. (in Chinese))

[10] 孙剑波. 开关磁阻电机的减振降噪和低转矩脉动研究[D]. 武汉: 华中科技大学,2005.

[11] 吴建华. 基于物理模型开关磁阻电机定子模态和固有频率的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8): 109-144. (WU Jianhua. Study on the stator mode shapes and natural frequencies of switched reluctance motor based on real structure model[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering,2004,24(8): 109-144. (in Chinese))

[12] 马世伟. 低振动与噪声的开关磁阻电机研究[D]. 株洲: 湖南工业大学,2012.

[13] SRINIVAS K N,ARUMUGAM R. Static and dynamic vibration analyses of switched reluctance motors including bearings,housing,rotor dynamics,and applied loads[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2004,40(4):1911-1919.

[14] 赵天环,高国旺,王卫民,等. 基于 ANSYS 的开关磁阻电机定子振动模态分析[J]. 电机与控制应用,2013,40(5): 6-9. (ZHAO Tianhuan,GAO Guowang,WANG Weiming,et al. Modal analysis of stator vibration of switched reluctance motor based on ANSYS[J]. Electric Machines & Control Application,2013,40(5): 6-9. (in Chinese))

[15] LEE J,SEO J H,KIKUCHI N. Topology optimization of switched reluctance motors for the desired torque profile[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization,2010,42(5):783-796.

[16] 杨艳. 无轴承开关磁阻电机振动分析与抑制的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2010.

[17] 郝玉伟. 无轴承开关磁阻电机及其定子振动分析[D]. 北京: 北京交通大学,2015.



· 简 讯 ·

河海大学 2016 年科技工作硕果累累

2016 年,河海大学科技工作紧密围绕以提高科技整体创新能力和取得高水平科技成果为目标,完善科研管理机制,加强科研经费管理,推进科技评价改革,促进科技成果转化,加强基地建设,各项工作得到稳步推进,重点工作有新的突破,为推进学校“双一流”建设提供了有力支撑。

获国家重点研发计划牵头项目 2 项、课题 16 项。获国家自然科学基金项目 137 项(其中重点项目 3 项),获国家社科基金项目 13 项(其中重大项目 1 项,重点项目 1 项)。首次获得陆军装备发展部项目 3 项、军委装备发展部预研基金 1 项。

科技奖励成果丰硕,获国家奖 3 项,省部级以上科技奖 73 项。其中,国家科技进步奖一等奖 1 项,国家技术发明奖二等奖 2 项,高等学校科学研究优秀成果奖 3 项,大禹水利科学技术奖 3 项,全国教育科学研究优秀成果奖二等奖 1 项,省哲学社会科学优秀成果奖 8 项。

高水平论文数量持续攀升,发表 SCI 论文 980 篇,EI 论文 1246 篇,SSCI 论文 24 篇,CSSCI 论文 346 篇。发明专利授权量稳步大幅提升,授权国内发明专利 687 件;PCT 国际专利申请 24 件,获国外授权发明专利 3 件。获中国专利优秀奖奖 1 项。

科研平台建设及技术转移工作取得新发展,浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室评估优秀,2 个省级工程中心顺利通过绩效评估。获批省级工程中心 1 项、省教育厅高校重点实验室 1 项。技术转移中心顺利通过科技部对国家技术转移示范机构的考核及江苏省科技厅的绩效评估。

(本刊编辑部供稿)