

# The Finite Element Analysis and System Experimental Study of Novel BLDCM

Guanlin Wu, Xiying Ding, Aimin Liu

School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning  
Email: 721820675@qq.com

Received: Dec. 6<sup>th</sup>, 2016; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2016; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Brushless DC Motor has been widely applied in automotive, aerospace, household appliances and other fields with its advantages of simple structure, high efficiency and convenience of control. Novel Brushless DC Motor is a new structural motor designed on the basis of traditional Brushless DC Motor, which adopt double sets of salient-pole stator and rotor and use centre excitation coil instead of rotor permanent magnet, with the characteristics of high air-gap flux and large starting torque. The structure and operation principle are introduced in this paper. Through the three-dimensional model built on the general parameters of the motor structure, the electromagnetic and mechanical performances are analyzed by using the 3-D finite element method. Then the motor's performance has been tested by no-load experimental. The simulation and experimental results verify that the motor has traditional Brushless DC Motor' characteristics of simple structure and high reliability, and has the advantage of high efficiency and great capacity to expand speed, which has reference value for its realization in industrial transmission system.

## Keywords

Brushless DC Motor, Finite Element, Electromagnetic Performance, Mechanical Performance

---

# 新型无刷直流电机有限元分析及系统试验研究

吴冠霖, 丁惜瀛, 刘爱民

沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳  
Email: 721820675@qq.com

## 摘要

无刷直流电机以其结构简单、效率高及易于控制等特点，已在汽车、航天、家用电器等领域得到了广泛的应用。新型无刷直流电机是在传统无刷直流电机的基础上提出的新结构电机，该电机采用双组凸极定子结构，并利用中央线圈替代了转子永磁体励磁，具有高气隙磁通、启动转矩大的特点。该文对电机的结构及工作原理进行了介绍。根据电机结构的基本参数，构建电机的三维模型，运用三维有限元仿真对电机的电磁特性和机械运动特性进行研究，并通过空载实验验证了新型无刷直流电机不但具有传统无刷直流电机结构简单，可靠性高的特点，而且效率高、扩速能力强，对于实现其在工业传动系统中的应用具有参考价值。

## 关键词

无刷直流电机，有限元，电磁特性，机械运动特性

## 1. 引言

无刷直流电机以其结构简单、效率高及易于控制等特点，已在汽车辅助设备、航空航天、家用电器、工业生产等各个领域得到了广泛的应用[1] [2]。新型无刷直流电机是在传统无刷直流电机的基础上，提出的新型电机。其采用 9-6 式双组凸极定子结构，利用“磁阻最小原理”产生切向拉力，实现电机起动、制动、停车及四象限运行；并利用中央激磁线圈产生辅助磁场，通过调节线圈直流电增减气隙磁通密度，获得宽范围气隙磁通和速度控制。因此新型无刷直流电机不但具有传统无刷直流电机结构简单，可靠性及转矩质量比高的特点，并具有转动惯量小、启动时间短、启动转矩高、扩速能力强等优势[3] [4] [5] [6] [7]，同时避免了传统无刷直流电机永磁磁通无法调节、退磁风险、高速性能受机械强度限制等缺点[8] [9] [10]。

本文介绍了新型 BLDCM 的结构及工作原理。运用 ANSYS Maxwell 软件，根据电机结构的基本参数，构建了电机的三维模型，对电机的电磁及机械运动特性进行研究。通过三维有限元方法仿真验证了电机启动时间短，启动转矩大，扩速能力强的特点。通过新型 BLDCM 的空载实验，电机转速特性与三维有限元仿真分析的结果基本一致，验证了电机的性能，表明此电机能够应用于要求有启动转矩大、响应速度快，调速范围宽等工况，对于实现新型 BLDCM 在工业传动系统中的应用具有参考价值。

## 2. 新型 BLDCM 结构及原理

新型 BLDCM 由定子、转子、转轴、机壳和线圈五部分构成，其整体结构截面图如图 1 所示。电机的定子及转子均由硅钢片叠压而成，采用 9-6 式的双组凸极结构，如图 1(a)所示，两侧定子完全对称于转轴中央垂直面。定子凸极上缠有励磁绕组，同侧 9 个绕组绕线方式相同，按照顺时针相互间隔分为 A、B、C 三相；两侧励磁绕组相序排列相同，绕线方式相反，两侧对应相绕组相互串联。转子固定在转轴上，随转轴旋转，定子之间有一定的气隙。转轴与机壳同轴设置。电机通电后，通电相定子励磁绕组产生磁场，根据“磁阻最小原理”，相离最近的转子凸极会向通电相定子凸极对齐位置靠近，对应相依次通电，则转子连续转动。

两侧励磁绕组绕线方式相反，因而通电时产生的磁场方向相反，磁通由一侧定子凸极，经机壳与另一侧定子凸极，再经转轴传导回来，形成闭合回路，如图 1(b)所示。除定子励磁绕组外，电机的线圈还包括中央激磁线圈，其固定于电机机壳中间，通入可调直流电流后，将产生轴向磁通，磁通路径与

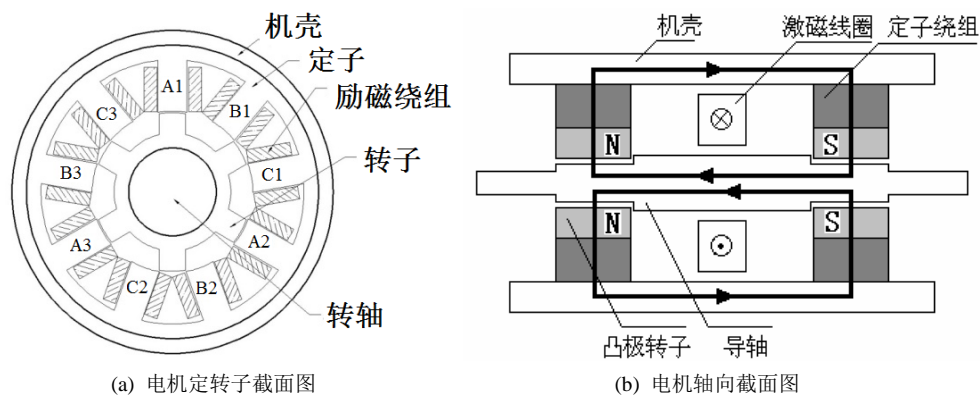


Figure 1. The cross-section diagram of Novel BLDCM  
图 1. 新型无刷直流电机截面图

励磁绕组产生的磁通路径一致。当激磁线圈通入正向电流时，产生的磁通方向与励磁绕组产生的磁通方向一致，该磁势将增强气隙磁通，可增大电机输出的电磁转矩；当激磁线圈通入反向电流时，产生的磁通方向与励磁绕组产生的磁通方向相反，该磁势将抵消一部分励磁绕组产生的气隙磁通，可减小电机输出的电磁转矩。因此线圈中通入不同的可调直流电流，可以产生调磁效果，进而调节电机的转矩、转速特性，因此电机具有启动转矩大、响应速度快的优点。同时，激磁线圈替代了传统无刷直流电机的转子永磁体，从而避免了永磁磁通无法调节、退磁风险、高速性能受机械强度限制等缺点。

### 3. 新型 BLDCM 性能有限元分析

为准确分析新型 BLDCM 的性能，本文采用三维有限元方法对其进行仿真分析。电机额定电压为 300 V；定子外径 200 mm，定子极弧  $30^\circ$ ，极数 9；转子内外径分别为 54 mm、107 mm，转子极弧  $30^\circ$ ，极数 6。根据电机结构的这些基本参数，在 ANSYS Maxwell 软件中构建电机的三维模型，对电机的电磁特性及机械运动特性进行研究。具体分析结果如下。

#### 3.1. 新型 BLDCM 磁通分析

新型 BLDCM 工作时，定子三相励磁绕组根据定转子凸极相对位置依次供电，将产生励磁磁通；激磁线圈通入直流也将产生与励磁磁通路径一致的磁通，改变线圈电流的大小或方向可以调节电机气隙磁通的大小。线圈中通入 2 A 的直流电流时，电机产生磁通的传导方向及分布如图 2 所示；当电机励磁绕组施加 100 V 的直流电压，与 2 A 激磁电流共同产生磁通，则电机整体磁通示意图如图 3 所示。

从图中可以看出，定子励磁绕组产生的磁通由一侧的定转子凸极，经机壳与另一侧的定转子凸极，再经转轴传导回来，形成闭合回路。线圈产生的磁通路径与定子励磁绕组产生的磁通一致，为轴向励磁方式，两端转子处分别构成 N 极和 S 极。如图 3 所示，当线圈通入正向 2 A 直流电时，电机整体的气隙磁通明显增大。因而可通过改变线圈通入的电流，调节电机的气隙磁通，进而改善电机的转矩、转速特性，使得电机具有启动转矩大、响应速度快的特点。

#### 3.2. 新型 BLDCM 空载分析

根据上文所述，在磁密不饱和的情况下，保持电机励磁绕组电压不变，改变激磁线圈的电流将增强或减弱电机的气隙磁通，将会改变电机的转矩、转速等运行性能。因此在保持励磁绕组电压 100 V，线圈电流为 0 A 和 2 A 的条件下，分别对电机进行空载仿真分析，以验证电机的性能，可得电机启动时的转矩、转速特性曲线分别如图 4 所示，定子励磁绕组起动电流如图 5 所示。

由图 5 可知电机快速起动趋于稳定运行后, 电流很小, 电机耗能小, 发热少。由图 4(a)电机转矩曲线可以得出, 在激磁线圈未通入电流时, 电机在 16.8 ms 达到峰值扭矩 97.6 N·m, 稳定运行后转矩波动较小; 在激磁线圈通入 2 A 电流时, 电机在 11.2 ms 达到峰值扭矩 137.5 N·m, 与激磁线圈未通入直流电的空载仿真结果相比, 电机启动时的峰值扭矩约提升 40%, 达到峰值扭矩的时间缩短 5.6 ms。由图 4(b)电机转速曲线可以得出, 在激磁线圈未通入电流时, 电机在 24.8 ms 时达到最大转速 405 rpm, 并在 32 ms 趋于稳定转速 380 rpm; 在激磁线圈通入 2 A 电流时, 电机在 20 ms 左右达到最大转速 502 rpm, 并在 28 ms 趋于

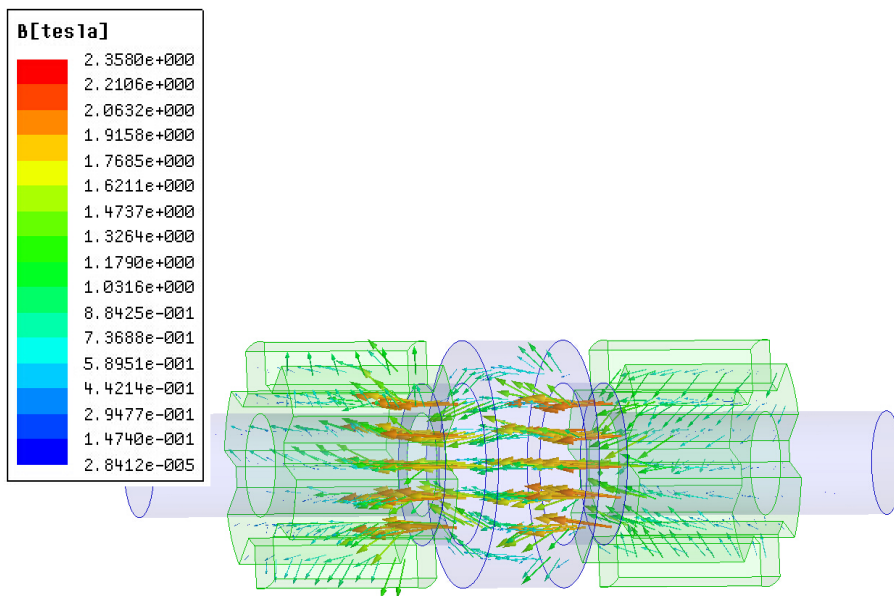


Figure 2. The excitation coil magnetic flux diagram  
图 2. 激磁线圈磁通示意图

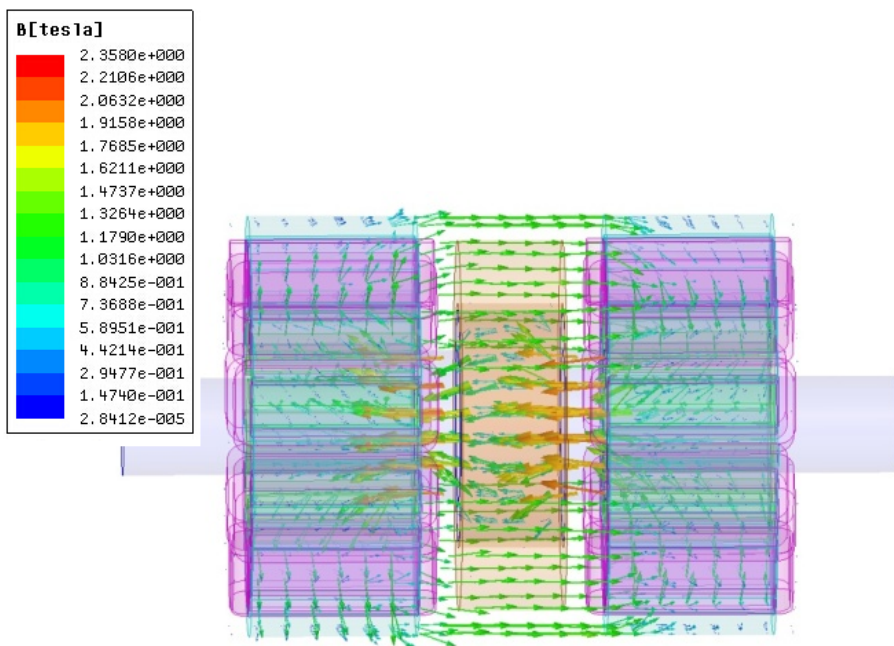


Figure 3. The motor entirety magnetic flux diagram  
图 3. 电机整体磁通示意图

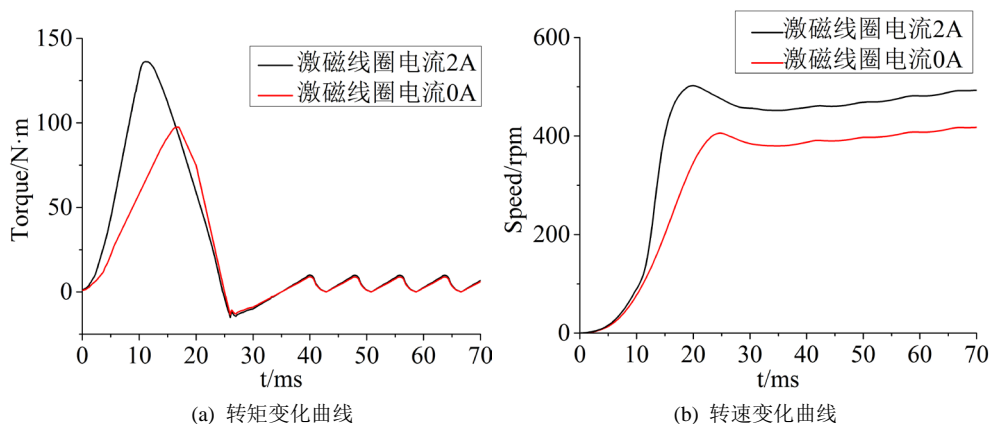


Figure 4. Motor torque and speed curve  
图 4. 电机转矩及转速变化曲线

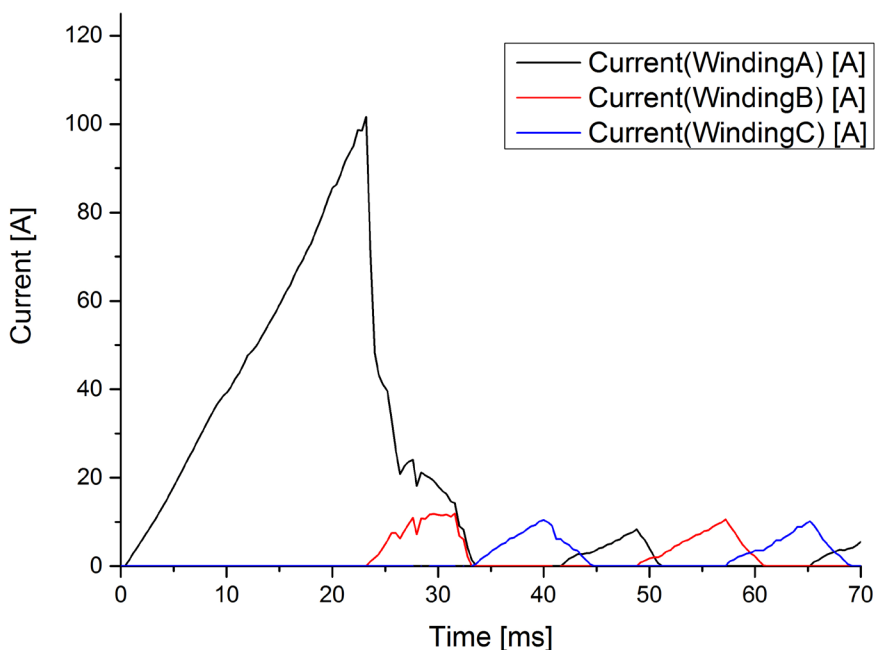


Figure 5. Starting current curve  
图 5. 启动电流变化曲线

稳定转速 455 rpm，与激磁线圈未通入直流电的空载仿真结果相比，电机启动时的最大转速约提升 25%，达到最高转速的时间缩短 5 ms，稳定转速约提升 19%。通过激磁线圈未通入电流与通入 2 A 电流时的电机转矩与转速对比分析可以看出，激磁线圈通入正向直流电可起到增磁的作用，使得电机的峰值扭矩与最大转速明显提升，响应速度加快，同时拓宽了电机的调速范围。通过运用三维有限元分析方法进行空载仿真分析的结果也验证了电机具有启动转矩大，响应速度快，耗能小发热少的特点。

#### 4. 实验验证

新型 BLDCM 实验平台如图 6 所示。利用电机实验平台，在与空载仿真相同的条件下即励磁绕组电压 100 V，激磁线圈电流为 0 A 和 2 A 的条件下，分别对电机进行空载试验以验证电机的性能，得到电机的转速波形如图 7 所示。

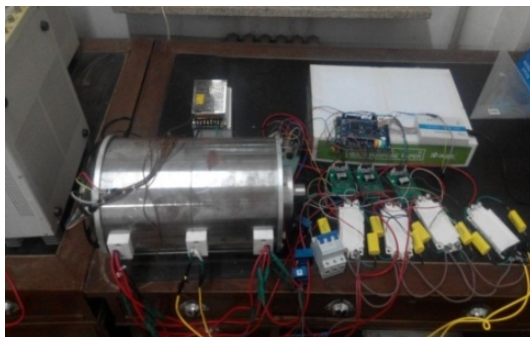


Figure 6. Novel BLDCM experimental platform  
图 6. 新型 BLDCM 实验平台

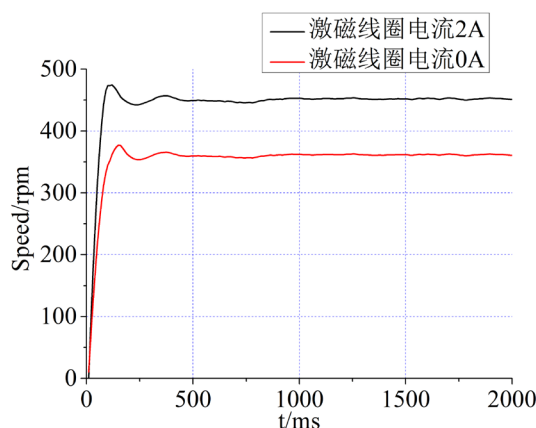


Figure 7. Experimental waveforms of speed  
图 7. 新型 BLDCM 转速实验波形

由图 7 可以看出,在激磁线圈未通入电流时,电机在 150 ms 左右达到最大转速,最大转速约为 380 rpm,转速稳定运行后转速约为 360 rpm;在激磁线圈通入 2 A 电流时,电机在 100 ms 左右达到最大转速,最大转速约为 475 rpm,转速稳定运行后转速约为 450 rpm。与激磁线圈未通入直流电的空载实验结果相比,电机启动时的最大转速约提升 25%,达到最高转速的时间缩短 50 ms,稳定转速约提升 25%。通过对比分析可以看出,激磁线圈调磁效果明显,使电机的转速及响应速度显著提升。

实验中为保护控制系统电路,采用 PWM 占空比 90% 的方式为励磁绕组供电,而仿真时定子励磁绕组未采用 PWM 的方式供电,并且电机实际中会有机械摩擦及功率器件损耗的影响,因此实验结果与理想仿真情况下相比,但电机转速及响应速度略有降低。空载实验结果进一步验证了新型 BLDCM 能在短时达到稳定转速,转速波动小,电机运行性能良好。

## 5. 结论

本文研究了新型 BLDCM,对电机的结构及运行原理进行了介绍,采用三维有限元方法对电机进行准确的仿真分析,并进行了电机的空载实验,通过仿真及电机空载实验数据得出以下结论:

1) 根据电机结构的基本参数,运用 ANSYS Maxwell 软件构建电机的三维模型,采用三维有限元的方法对电机的电磁特性和机械运动特性等动态特性进行了研究,仿真分析结果说明激磁线圈调磁效果明显,验证了电机具有宽磁通范围、启动转矩大,响应速度快,耗能小发热少的优点。

2) 通过电机的空载实验验证了电机的性能,结果与三维有限元方法仿真分析的结果基本一致,验证

了电机启动时间短、扩速能力强、转速稳定性好的优点。表明此电机能够应用于要求响应速度快、启动转矩大、调速范围宽等的工况。对于实现新型 BLDCM 在工业传动系统中的应用具有参考价值。

### 参考文献 (References)

- [1] 夏长亮, 方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 25-34.
- [2] 夏长亮, 张茂华, 王迎发, 等. 永磁无刷直流电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 104-109.
- [3] Xia, C.L. (2012) Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls. John &Wiley Inc., Singapore.
- [4] 邹继斌, 李建军, 徐永向, 等. 驱动方式对永磁无刷直流电机损耗的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 43-47.
- [5] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 叶金虎. 无刷直流电动机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] 嵇恒. 新型混合励磁开关磁阻电机的基础研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [9] 李明哲. 混合励磁开关磁阻电机的基础研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [10] 李柏松. 开关磁阻电机直接转矩控制策略的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jee@hanspub.org](mailto:jee@hanspub.org)