

不同槽形和极数的永磁无刷电机的解析计算

The analysis about Brushless DC Motor with different pole or slot

徐启剑 王琪

苏州爱知科技有限公司

摘要：本文在 JMAG 中建立不同铁芯形状和相同叠高的 6p18s,4p6s,6p9s,4p24s 四款永磁无刷电机模型，通过有限元仿真磁界解析得出了不同极数和槽数电机在空载和负载时磁链和扭矩的变化情况，以及空载反电动势对电机效率的影响。

关键词：JMAG、永磁无刷电机、空载反电动势、铁损、扭矩脉动

Abstract: We create four different shape and poles of brushless motor and analyze them in finite element simulation with the help of JMAG. Compare the changes in the flux, torque, and iron loss,etc, and the effect on motor efficiency.

Key words: JMAG、Brushless DC Motor、Iron Loss、Torque Ripple

1 引言

无刷直流（Brushless Direct Current, BLDC）马达是一种正快速普及的马达类型，它可在家用电器、汽车、航空航天、消费品、医疗、工业自动化设备和仪器等行业中使用。BLDC 马达不用电刷来换向，而是使用电子换向，因此和有刷直流马达以及感应马达相比，有更好的转速—转矩特性、运转无噪音、 较高的转速范围等优点。

其中，转矩特性是 BLDC 马达的重要指标，通过对马达铁芯形状、永磁体形状的调整，可以使输出转矩与电机体积之比更高，使之在需要着重考虑空间与重量因素的应用中，大有用武之地。

在本应用实例中，我们将对不同槽形和极数的 BLDC 马达进行有限元仿真分析，并对分析结果进行比较汇总，从磁阻力矩，反电动势，铁损等结果的对比分析中，看出不同式样对马达最终效率的影响。

2 设计要求

2.1 设计的额定值

电机类型	式样	转速 (r/min)	额定电压 (V)
a	6p18s	3600	380
b	4p6s	3600	380
c	6p9s	3600	380
d	4p24s	3600	380

2.2 电机的运行点如表 1 所示

表 1 电机运行点

性能项	转速	电流	频率
运行点	3600 (r/min)	2A	120HZ (4P)
			180HZ (6P)

3 电机基本尺寸设计综述

这 4 款电机都采用内转子结构，转子内嵌永磁体。

基本结构分别如图 1 所示。

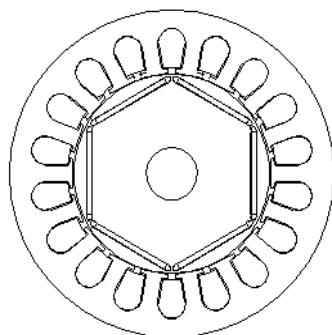


图 1-a 6p18s 电机示意图

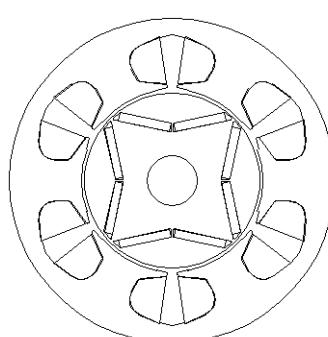


图 1-b 4p6s 电机示意图

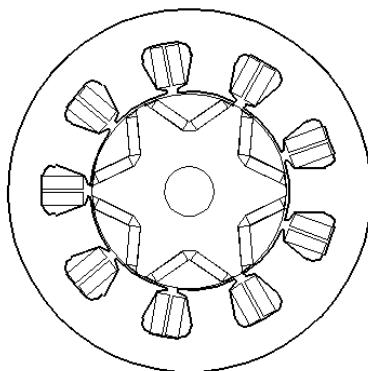


图 1-c 6p9s 电机示意图

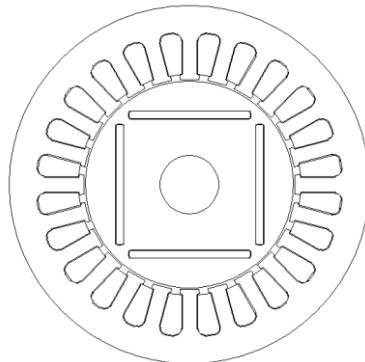


图 1-d 4p24s 电机示意图

4 有限元分析

对永磁无刷电机在 JMAG 软件中进行有限元计算和分析，电机的 2D 建模如图 2 所示。

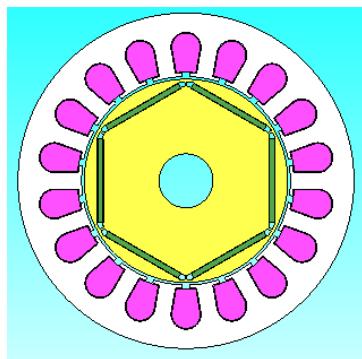


图 2-a 无刷电机 6p18s JMAG 2D 建模图

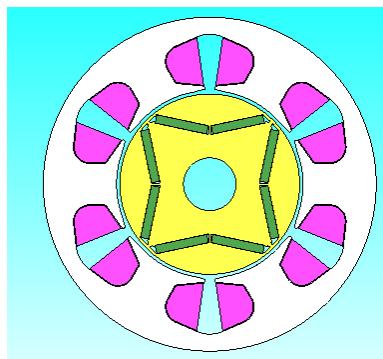


图 2-b 无刷电机 4p6s JMAG 2D 建模图

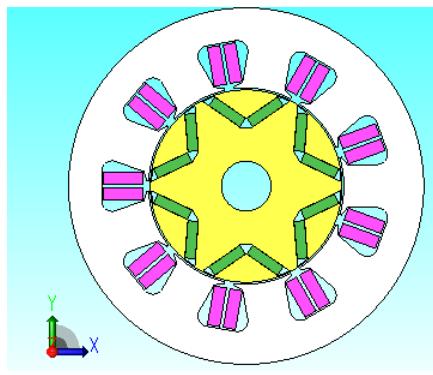


图 2-c 无刷电机 6p9s JMAG 2D 建模图

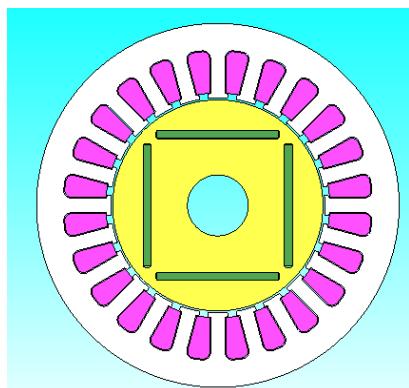


图 2-d 无刷电机 4p24s JMAG 2D 建模图

瞬态分析

4.1 空载情况

这 4 款电机使用 JMAG 分析的空载结果如下所示

电机	空载转矩 Nm	转速	空载铁耗 W	空载磁链	空载反电势
6p18s	±1.12	3600 (r/min)	8.9	标准正弦波	梯形波
4p6s	±0.09		8.8	标准正弦波	梯形波
6p9s	±0.60		12.5	标准正弦波	梯形波
4p24s	±0.24		8.0	标准正弦波	梯形波

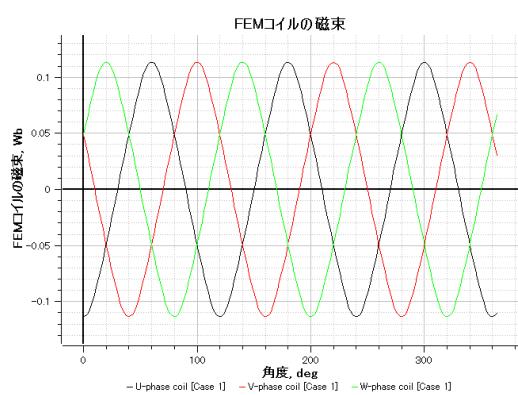


图 3-a 空载磁链

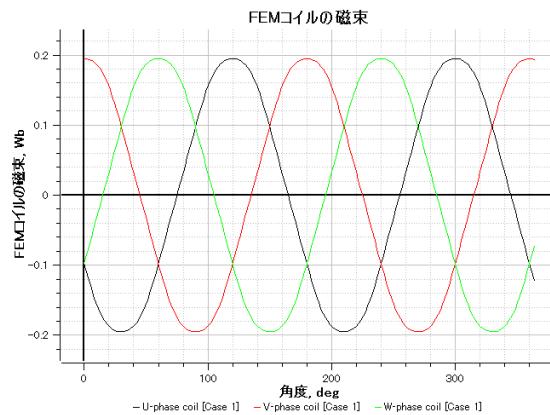


图 3-b 空载磁链

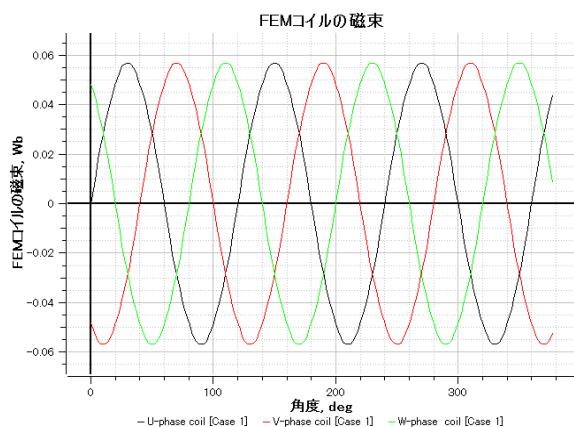


图 3-c 空载磁链

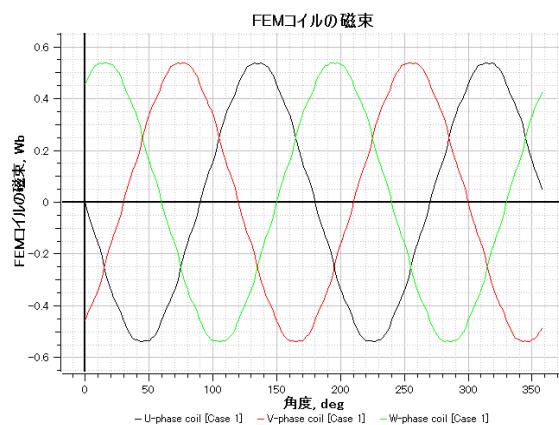


图 3-d 空载磁链

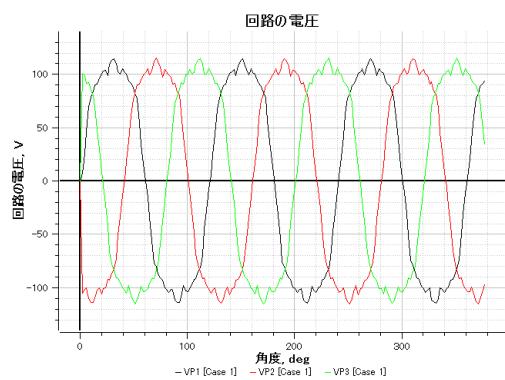


图 4-a 空载反电势

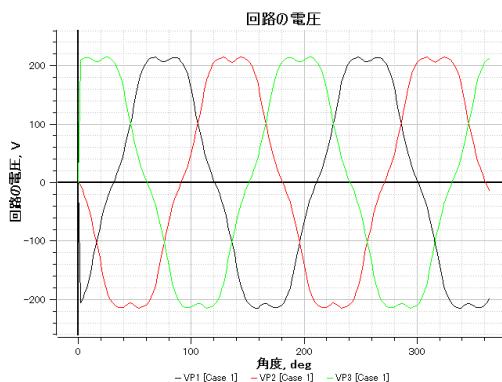


图 4-b 空载反电势

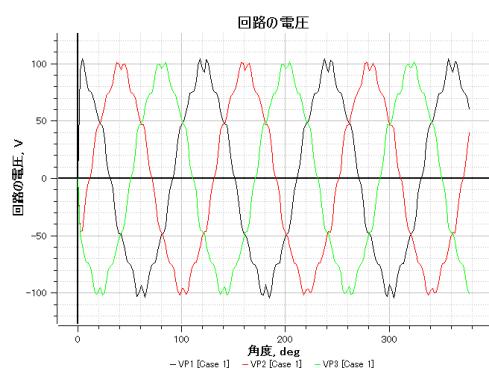


图 4-c 空载反电势

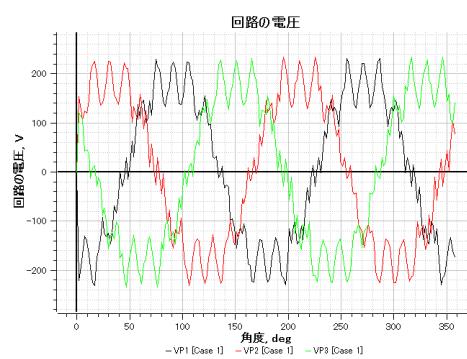


图 4-d 空载反电势

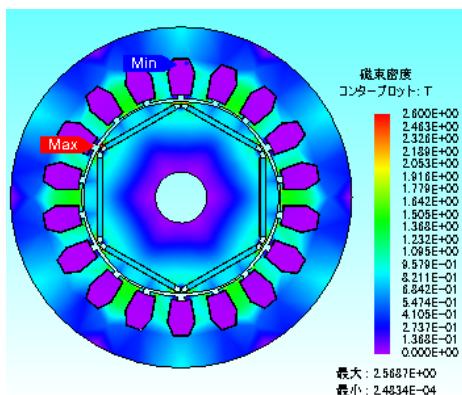


图 5-a 空载磁通密度

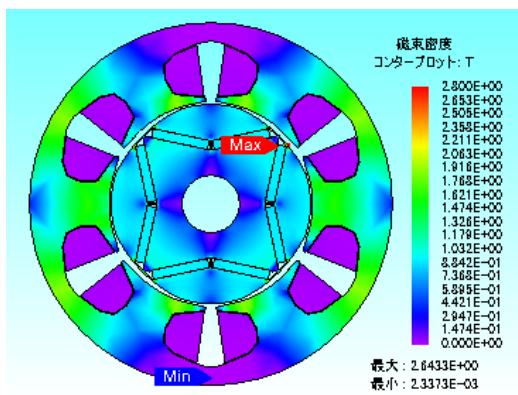


图 5-b 空载磁通密度

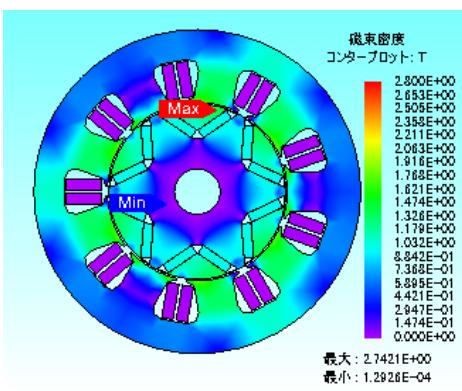


图 5-c 空载磁通密度

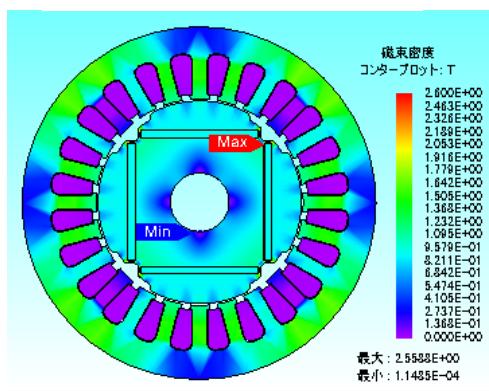


图 5-d 空载磁通密度

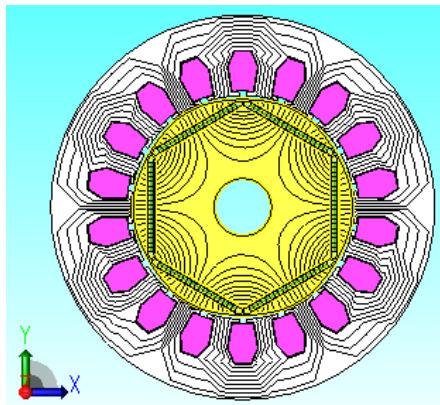


图 6-a 空载磁力线

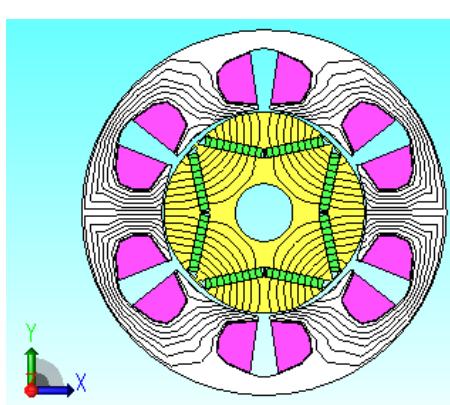


图 6-b 空载磁力线

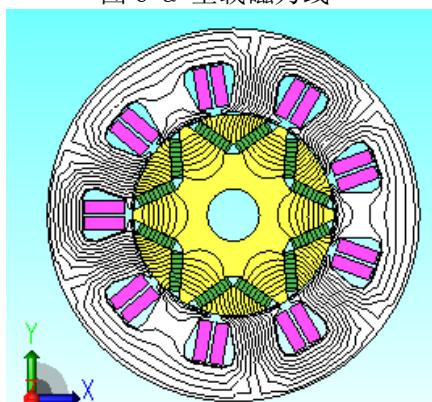


图 6-c 空载磁力线

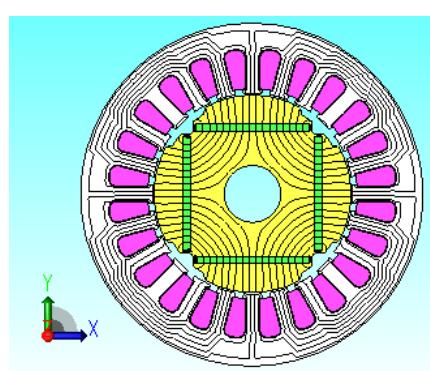


图 6-d 空载磁力线

4.2 负载情况

采用 JMAG 分析，对无刷 DC 电机在额定转矩、额定转速条件下的性能进行了分析。电机输出转速 n、输出转矩 T、各相有效电流值 I、铁耗平均值 P 如下所示：

电机	n (r/min)	T (Nm)	I (A)	P (W)
6p18s	3600	1.34	2.828	9.3
4p6s	3600	1.25	2.828	9.2
6p9s	3600	0.75	2.828	12.7
4p24s	3600	1.13	2.828	8.3

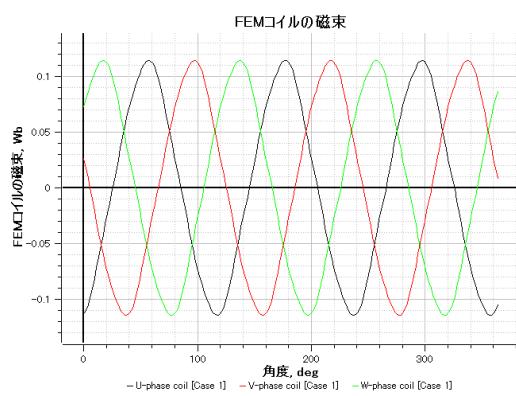


图 7-a 负载磁链

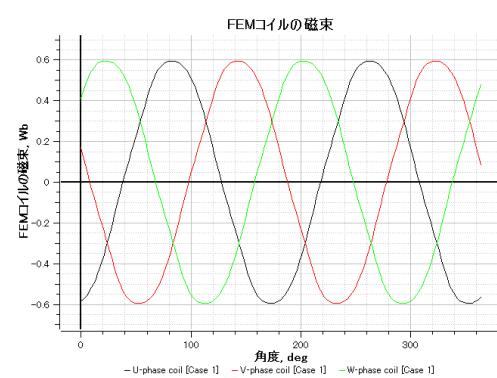


图 7-b 负载磁链

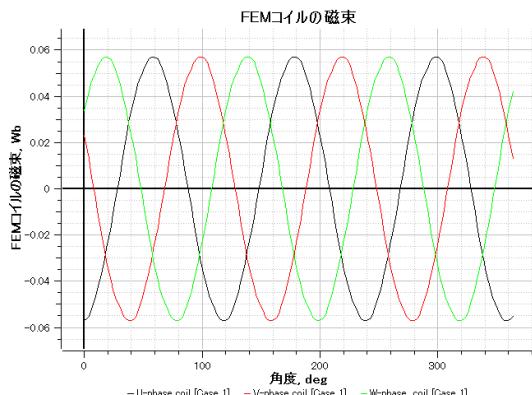


图 7-c 负载磁链

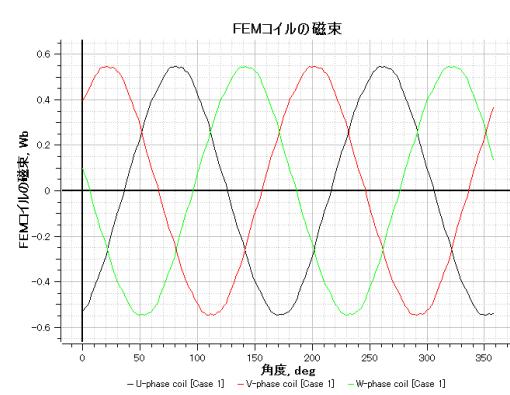


图 7-d 负载磁链

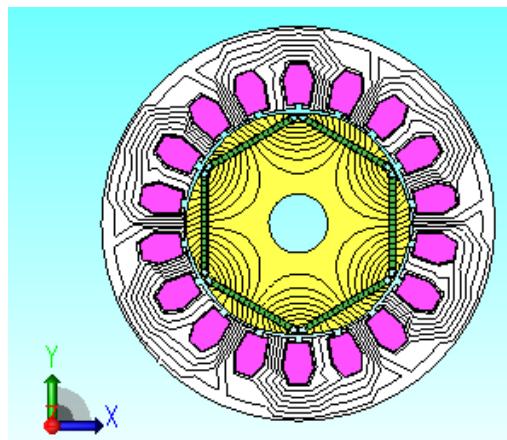


图 8-a 负载磁力线

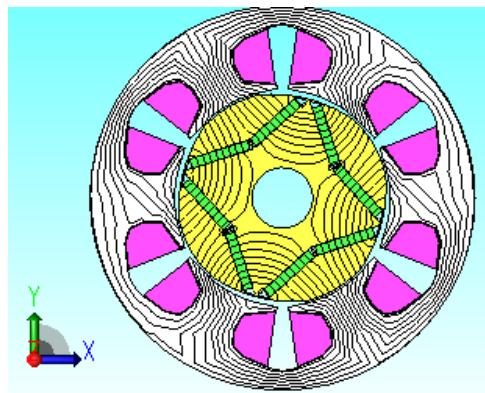


图 8-b 负载磁力线

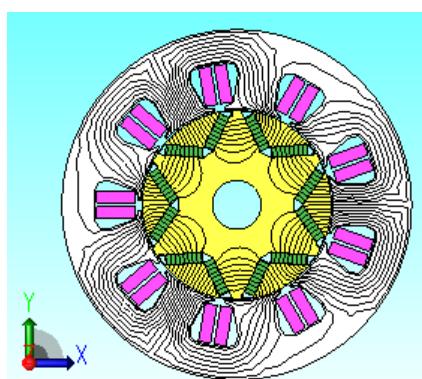


图 8-c 负载磁力线

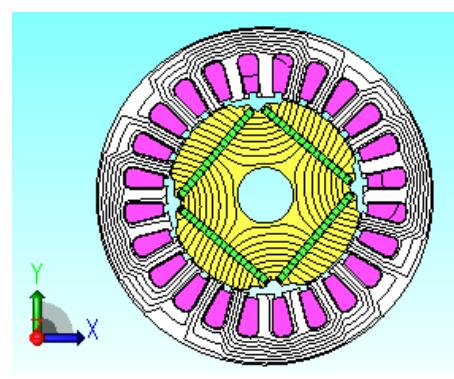


图 8-d 负载磁力线

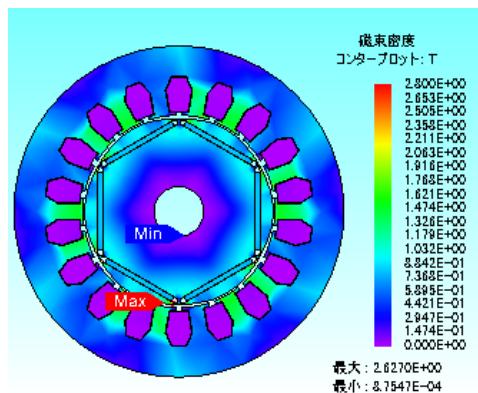


图 9-a 负载磁通密度

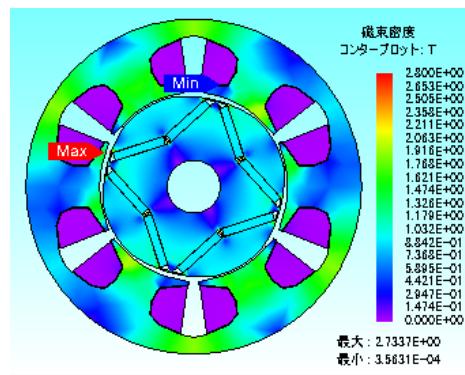


图 9-b 负载磁通密度

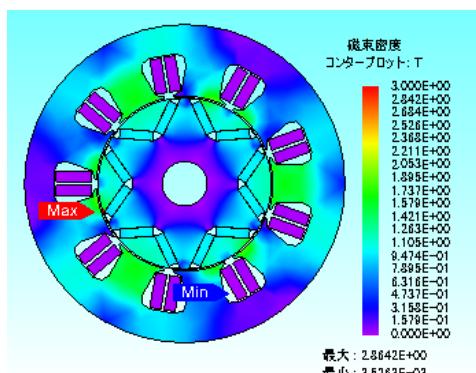


图 9-c 负载磁通密度

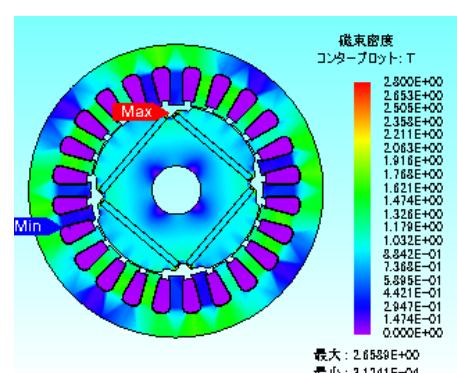


图 9-d 负载磁通密度

5 效率计算

此处涉及到的损耗包括铜耗 PCu、铁耗 PFe、杂项损耗 Ps

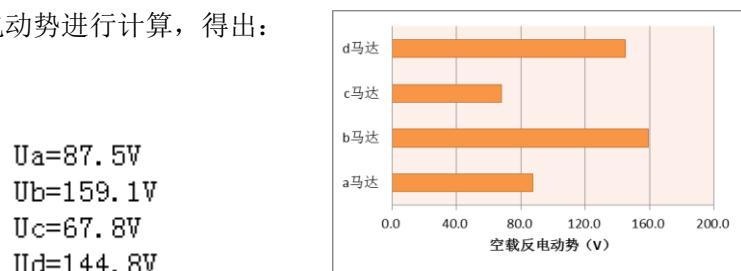
马达	输出功率(W)	铜耗(W)	铁耗(W)	杂散损耗(W)	总损耗(W)	马达效率
a	250.0	17.4	9.3	1.25	28.0	89.9%
b	233.1	7.7	9.2	1.67	18.0	92.8%
c	139.9	2.6	12.7	0.69	16.0	89.7%
d	210.8	5.8	8.3	1.05	15.1	93.3%

6 结果分析

6.1 空载反电动势对马达效率的影响

通过有限元分析，得到四款马达的空载反电动势波形。

对空载反电动势进行计算，得出：



6.2 磁阻力矩波形对马达效率的影响

对无通电时磁阻力矩的脉动波形进行下述比较。

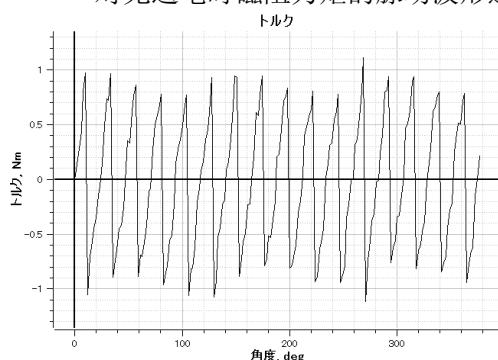


图 10-a 空载转矩（可认为是齿槽转矩）

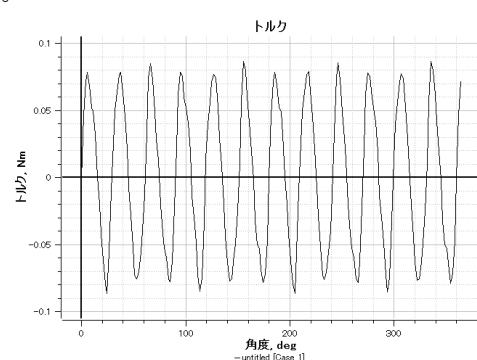


图 10-b 空载转矩（可认为是齿槽转矩）

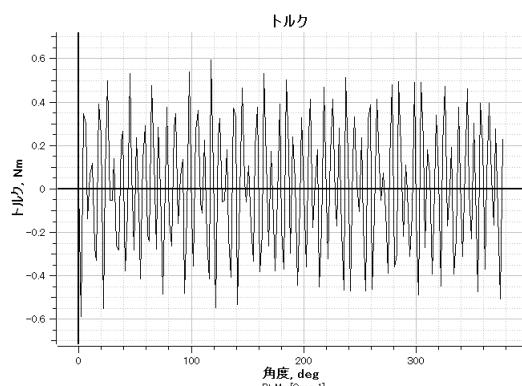


图 10-c 空载转矩（可认为是齿槽转矩）

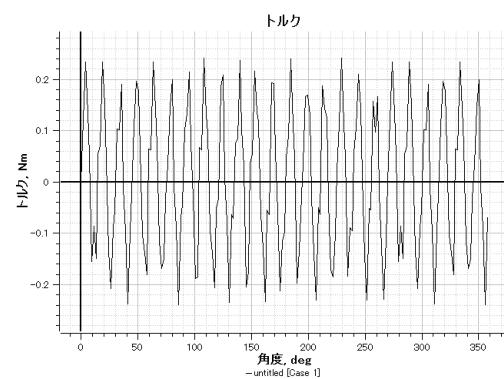
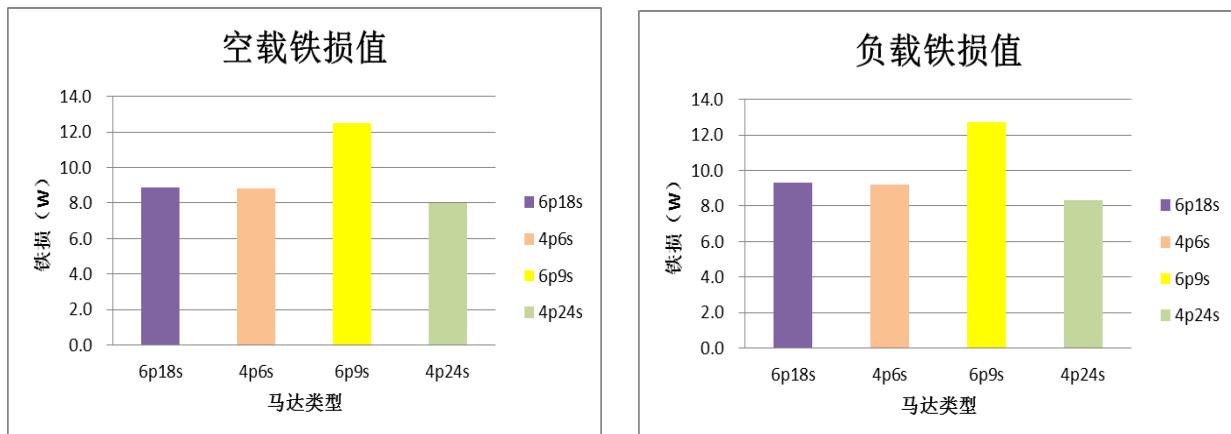


图 10-d 空载转矩（可认为是齿槽转矩）

6.3 铁损对马达效率的影响

对 4 种式样马达的空载和负载铁损值进行比较，结果如下：



从以上有限元仿真结果可以看出，铁芯磁钢的形状，槽形和永磁体形状的不同，会对扭矩脉动，铁损造成差异，从而影响电机的输出功率和效率，因而实际应用过程中应当选择合适的槽形和永磁体形状，以达到最大永磁体利用率并降低转矩脉动的目的。

7 参考文献

- [1] 永磁体实际形状及充磁偏差对永磁无刷电机空载反电动势的影响 磁性行业资讯 2013 第 10 期
- [2] A Simple Current Control Algorithm for Torque Ripple Reduction of Brushless DC Motor Using Four-Switch Three-Phase Inverter, Sang-Hyun Park, Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn, Dong-Seok Hyun, Department of Electrical Engineering, HanYang University, HaengDang Dong, SungDong Gu, SEOUL KOREA 133-791
- [3] 永磁无刷直流电机空载气隙磁场和绕组反电势的解析计算, 王兴华, 励庆孚, 王曙鸿, 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049