

基于 JMAG 的电动汽车轮毂电机铁损分析

张辉, 胡 焯, 江子和, 陈喜庭, 李雪原

(浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300)

摘要:针对电动汽车轮毂电机负载下的铁芯损耗问题,提出基于 JMAG 的电磁分析方案。采用控制变量的方法,通过 JMAG-Express 参数化模块,组建参数化电机模型,在轮毂电机负载状况下,通过 JMAG-Designer 和 JMAG-RT 软件联合仿真,对轮毂电机的铁损进行定量分析,并得出电机铁损对电机效率的仿真数据。结果表明:电机铁芯的材料及其厚度影响着电机的铁损,从而影响电机的效率,即硅钢片材料厚度越小,牌号越低,铁损值越小,在电机的高效区($\geq 80\%$)范围内对电机效率的影响越大。由此,可为电动汽车轮毂电机的优化设计和正确选型提供理论依据和实践指导。

关键词:电动汽车;轮毂电机;JMAG;铁损

中图分类号:TM35

文献标识码:A

文章编号:1671-5322(2017)03-0009-05

近年来,在我国经济快速增长和人民生活指数显著提高的同时,能源和环境问题日益突出。电动汽车因满足减少环境污染的需要而成为国家引导类的投资项目。轮毂电机作为电动汽车的重要组成部分,要有高转矩、高机械效率输出、高功率、低能耗、低发热等相关性能。由于铁芯的损耗是影响这些性能的主要因素之一,所以对轮毂电机定子的铁芯损耗研究具有重大意义,轮毂电机铁损分析备受国内外科研单位和学者的重视^[1]。

目前铁损分析计算主要有两种方案:一是直接实验测量,二是建立模型仿真计算^[2]。针对以上2种计算方案,国内外学者先后做了不同研究。Materu 等^[3]假设定子磁通波形是三角波,电机其他部分的磁通波形是基于定子磁通波形构造出来的,计算不同磁通波形的傅里叶分解得到每部分铁芯损耗的数值;Hayashi 等^[4]将铁损分为涡流损耗和磁滞损耗,涡流损耗通过磁密变换率的方程求得,磁滞损耗通过单极磁密波形实验方法得到;我国学者高洁^[5]通过对定子轭部与极部的磁密波形进行分解,进而进行铁损的数学推导得出结果。以上电机铁损求解都是基于 Preisach 模型^[6],不能直观地对比分析不同材料参数对电机

铁损的影响,本文通过 JMAG 软件仿真模型,对不同材料的铁芯和厚度不同的单片铁芯在同一款电机下进行定量分析,得出电机在不同负载状况下的铁损磁密分布、铁损数值和铁损对电机效率影响的关系图,并通过数据分析验证所设计的电磁分析方案的可行性。

1 轮毂电机铁芯材料的铁损原理

铁芯的损耗即铁损(或铁耗),主要分为2大类:一类是磁通密度 B 随时间变化引起的感应涡流损耗 W_e ;另一类是磁通密度 B 在充磁过程产生的磁滞损耗 W_h ^[7]。

1.1 涡流损耗

涡流损耗主要由磁通密度 B 、磁场交变频率 f 、铁芯原材料的板厚 d 和电阻率 ρ_{Fe} 决定。即使饱和区附近的磁通波形发生畸变,其有效值的磁通密度 B_{ve} 仍可计算^[8]。涡流损耗通常用经典理论值的 k 倍公式计算, k 为材质的物理常数。涡流损耗公式如下:

$$W_e = k \frac{(\pi f B_{ve}^2 d)^2}{6\rho_{Fe}} \quad (1)$$

$$B_{ve} = \{2 \int (dB/dt)^2 dt\}^{0.5} / (\pi f) \quad (2)$$

收稿日期:2017-03-04

作者简介:张辉(1991—),男,江苏盐城人,硕士生,主要研究方向为机电一体化、电机设计与试验技术。

由涡流损耗表达式(1)可以看出,由于磁通密度 B 由不同材料的特性决定,所以在同一个工频下,其涡流损耗取决于铁芯材料和铁芯原材料的板厚。

1.2 磁滞损耗

磁滞损耗大小可以用最大磁通密度 B_M 和表示材质条件或应力畸变的参数 k_h 来表示。材质的物理常数 k_h 随着材质内的磁分布不均匀或畸变而增加,在无取向性的电磁钢板中,磁感应强度在 $1T$ 以下时指数 k_h 约为 1.6 , $1.3T$ 以上时指数 k_h 约为 2 。磁滞损耗的计算如下式^[9]:

$$W_h = k_h f B_M^m \quad (m = 1.5 \sim 2.5) \quad (3)$$

由磁滞损耗公式(3)可以看出,在同一个工况频率下,磁滞损耗的大小取决于铁芯材料。

通过涡流损耗公式和磁滞损耗公式可知,在同一个工频下铁损的大小取决于铁芯材料和铁芯原材料的板厚。

2 轮毂电机铁损的分析流程

2.1 JMAG 软件简介

JMAG 为日本 JSOL 公司研发的一款针对电

磁场研究分析的软件,主要应用于各种电机的仿真设计与电磁设备的磁场分析。与同类型软件相比, JMAG 具有良好的工作界面、庞大的材料属性库、精确且高速的分析计算能力以及开放的接口界面等优势^[10], 广泛应用于电机制造行业。

2.2 参数设置

电机设计主要参数如下:转子外径 189 mm , 转子内径 182 mm , 磁极数 18 , 齿槽数 27 , 气隙 1 mm , 定子齿宽 6.2 mm , 磁钢宽 25 mm , 电机长度 50 mm , 定子直径 167 mm , 定子内径 74.2 mm , 槽口宽 4.95 mm , 定子轭 18.5 mm , 永磁体厚度 10 mm , 极弧系数 0.9 , 极靴 1.85 mm 。

2.3 分析流程

对于铁损分析的 2 个变量,即定子铁芯的“材料”和“厚度”,采取控制变量法,即在电机的其他设计参数全部保持不变的情况下,仅通过改变材料和仅改变厚度 2 种方案,对轮毂电机模型进行负载试验,分析铁损随铁芯材料或铁芯原材料厚度的变化规律。流程如图 1 所示。

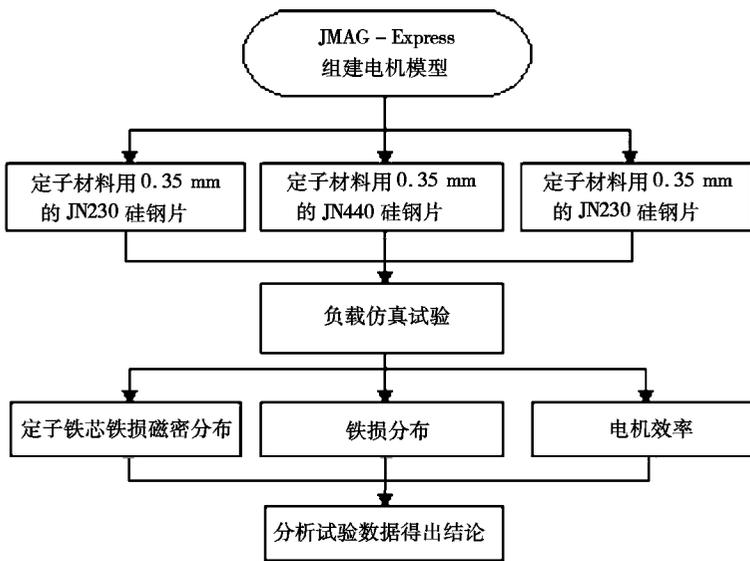


图 1 分析流程

Fig.1 Analysis process

3 仿真分析

3.1 参数化组建电机模型

使用 JMAG-Express 的参数化组建模型功能,进入电机的 power model 模块建立电机模型,如图 2 所示。模型电机输入电压为 72 V 。

3.2 电机的电路布置

电机绕线采用集中绕组法的星型连接,圈数为 20 圈。电机线路布置具体如图 3 所示。

3.3 仿真结果

3.3.1 定子铁芯铁损磁密分布

(1) 控制电机铁芯原材料的板厚不变

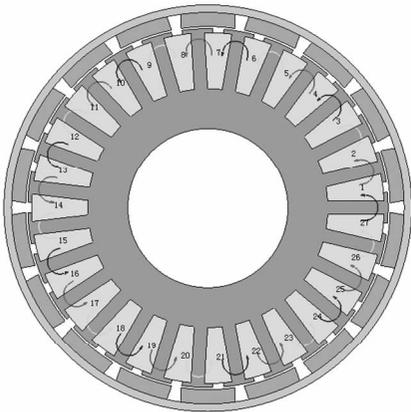


图2 电机模型图

Fig.2 Diagram of motor model

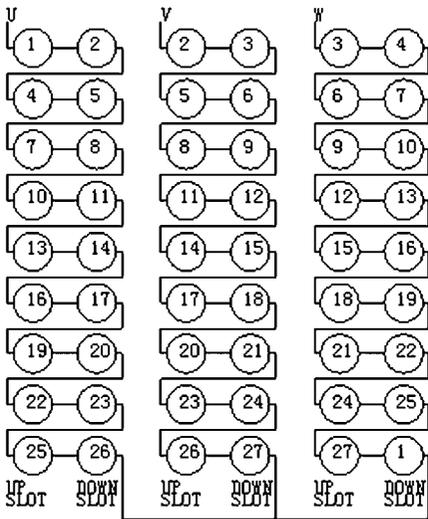


图3 绕组走线分布图

Fig.3 Distribution map of winding and routing

选用2种铁芯材料的电机,铁芯硅钢片型号分别为35JN230和35JN440,板厚均为0.35mm。在负载情况下恒定负载35Nm,2种材料的硅钢片铁损磁密分布如图4、图5所示。由图4可知,35JN230硅钢片铁损磁密分布为0~190000W/m³;由图5可知,35JN440硅钢片铁损磁密分布为0~650000W/m³。数据表明:材料厚度相同时,硅钢片牌号越低,铁损磁密分布范围越小。

(2)控制电机铁芯的材料不变

改变铁芯原材料的板厚,选用厚度为0.5mm、牌号为230的50JN230硅钢片,铁损磁密分布如图6所示。由图6可知,50JN230硅钢片铁损磁密分布为0~240000W/m³。比较图4、图6可知:材料相同时,硅钢片越厚,其铁损磁密分布范围越大。

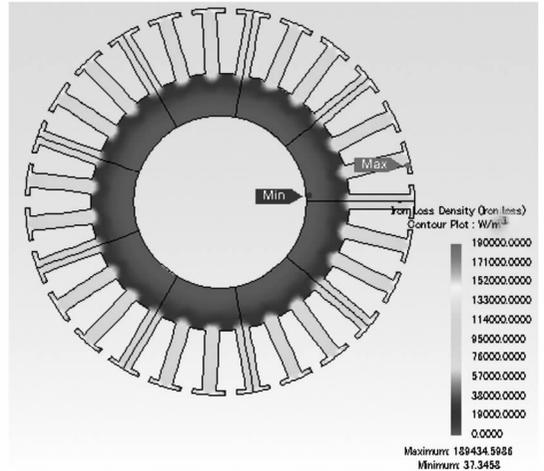


图4 35JN230 硅钢片铁损磁密分布
Fig.4 Iron loss magnetic density distribution of 35JN230 silicon steel sheet

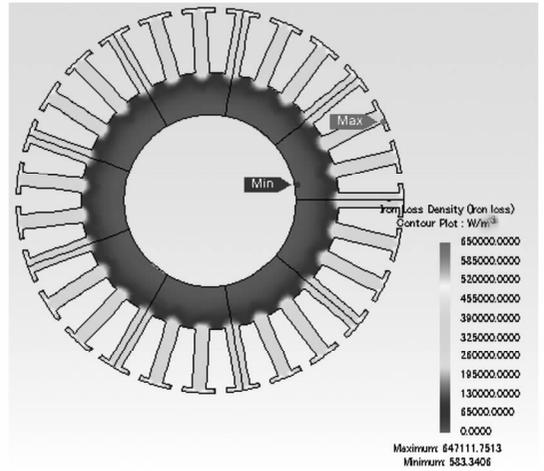


图5 35JN440 硅钢片铁损磁密分布
Fig.5 Iron loss magnetic density distribution of 35JN440 silicon steel sheet

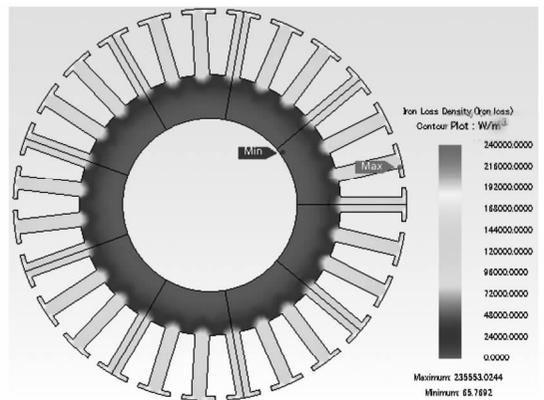


图6 50JN230 硅钢片铁损磁密分布
Fig.6 Iron loss magnetic density distribution of 50JN230 silicon steel sheet

由上可知,硅钢片材料厚度越小,牌号越低,铁损磁密分布范围越小。

3.3.2 不同铁芯材料的铁损分布

使用 3 种铁芯材料 35JN230、35JN440、50JN230,在电机转速为 770 ~ 800 r/min、电流为 15 ~ 50 A,恒定负载为 35 Nm 时,测得其铁损分布如图 7 所示。由图 7 可知:在上述条件下,3 种铁

芯材料 35JN230、35JN440、50JN230 的最大铁损分别为 38 W、107 W、40 W。由此可以推断:当铁芯原材料的板厚相同时,不同材料的涡流损失相差较大,且牌号值越大,最大涡流损失越大;当铁芯原材料相同时,不同厚度材料的涡流损失相差较小,但厚度越大时,最大涡流损失也越大。

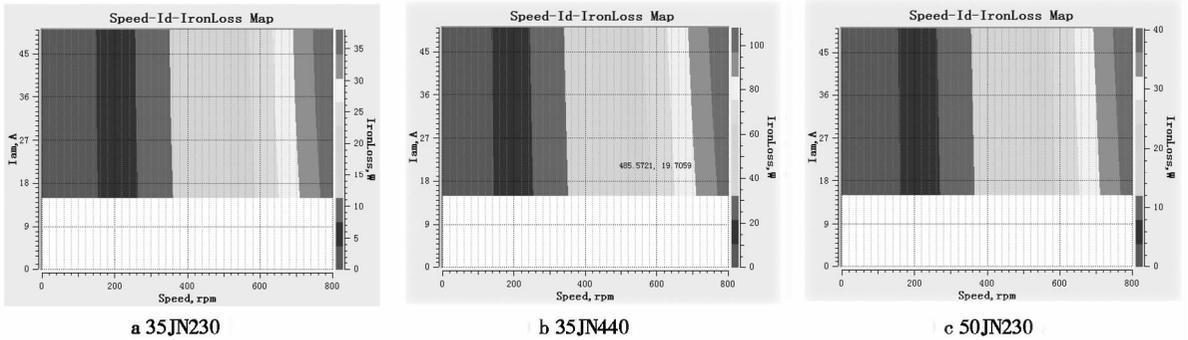


图 7 硅钢片铁损图

Fig. 7 Iron loss diagram of silicon steel sheet

3.3.3 铁损对电机效率的影响

在保持电机其它参数不变时,分别使用铁芯材料 35JN230、35JN440、50JN230,测试不同铁芯

材料及不同铁芯材料的板厚对电机效率的影响,结果如图 8 所示。

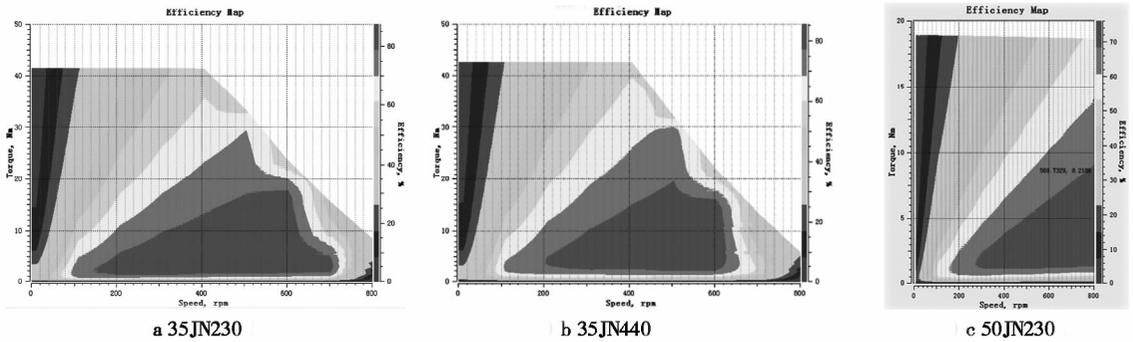


图 8 电机效率图

Fig. 8 Diagram of motor efficiency

由电机效率图 8 得出效率统计表,即表 1 所示。由表 1 可以看出,当电机铁芯原材料同为 JN230 时,厚度不同的 2 种材料 35JN230、50JN230,对电机的高效区($\geq 80\%$)范围影响差

距为 18.5%,且电机铁芯原材料厚度越小,硅钢片对电机的效率影响越大;当铁芯原材料的板厚都为 0.35 mm 时,2 种不同材料 35JN230、35JN440,对电机的高效区($\geq 80\%$)范围影响差距为 5.3%,

表 1 效率统计表

Table 1 Efficiency statistics

%

铁芯硅钢片型号	$\leq 90\% \sim 100\%$	$\leq 80\% \sim 90\%$	$\leq 70\% \sim 80\%$	$\leq 60\% \sim 70\%$	$\leq 50\% \sim 60\%$
35JN230	0.0	18.5	37.5	53.3	67.5
35JN440	0.0	13.2	32.7	49.9	65.0
50JN230	0.0	0.0	13.0	33.3	54.3

且原材料的牌号值越低,硅钢片对电机的效率影响越高。

4 结论

本文采用定量分析方法,通过 JMAG 软件模拟轮毂电机负载状况下,分析电机铁芯的损耗对

电机效率的影响。结果表明:电机铁芯的材料及其厚度影响着电机的铁损,从而影响电机的效率,即硅钢片材料厚度越小,牌号越低,铁损值越小,在电机的高效区($\geq 80\%$)范围内对电机效率的影响越大。由此,可为电动汽车轮毂电机的优化设计和正确选型提供理论依据和实践指导。

参考文献:

- [1] ZHENG J, WANG Y K, QIN X F, et al. An offline parameter identification method of induction motor[C]//World Congress on Intelligent Control and Automation, IEEE, 2008:8 898-8 901.
- [2] 韩志全. 高磁通密度铁粉芯的研发进展[J]. 磁性材料及器件,2011,42(2):4-8.
- [3] MATERU P N, KRISHNAN R. Estimation of Switched R eluctance Motor Losses[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1992,28(3):668-679.
- [4] HAYASHI Y, MILLER T J E. A New Approach to Calculating Core Losses in the SRM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1995,31(5):1 039-1 046.
- [5] 高洁,高冰. 基于改进 STEINMETZ 方程的 SR 电机铁损研究[J]. 微电机,2014,47(6):18-21.
- [6] RAULIN V, RADUN A, HUSAIN I. Modeling of losses in switched reluctance machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004,40(6):1 560-1 569.
- [7] 胡国立,赵乃宽,党宇. 电动机定子铁损实验的探讨[J]. 甘肃科技纵横,2017,46(2):35-37.
- [8] 王晓远,李娟,齐利晓,等. 永磁同步电机转子永磁体内涡流损耗密度的计算[J]. 沈阳工业大学学报,2007,29(1):48-51.
- [9] 胡立发,周廉,张平祥,等. 高温超导体的磁化与磁滞损耗[J]. 物理学报,2001,50(7):1 359-1 365.
- [10] 周强,朱学忠,刘闯. 基于 JMAG 的开关磁阻电动机场路直接耦合分析[J]. 微电机,2007,40(10):1-5.

Analysis of Iron Loss of In-wheel Motor for Electric Vehicle Based on JMAG

ZHANG Hui, Hu Ye, JIANG Zihe, CHEN Xiting, LI Xueyuan

(College of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an Zhejiang 311300, China)

Abstract: Aiming at the problem of iron core loss under the in-wheel motor load, an electromagnetic analysis scheme based on JMAG is proposed. By adopting the method of controlling variables, the parameterized motor model is established by means of JMAG-Express parametric module. In the case of in-wheel motor load, the iron loss of the in-wheel motor is quantitatively analyzed by the joint simulation of JMAG-Designer and JMAG-RT software. And the simulation data of the motor iron loss on the motor efficiency are obtained. The results show that the material and thickness of the motor core affect the iron loss of the motor, thus affecting the efficiency of the motor. The smaller the thickness of the silicon steel sheet material, the lower the grade, the smaller the iron loss value, the greater the effect on motor efficiency within the range of high efficiency area ($\geq 80\%$) of the motor. Therefore, it can provide the theoretical basis and practical guidance for the optimal design and correct selection of in-wheel motor for electric vehicles.

Keywords: electric vehicle; in-wheel motor; JMAG; iron loss