

基于 Maxwell 的电动汽车轮毂电机电磁损耗特性分析*

张 琪¹, 雷良育^{1,2}, 刘国辉¹, 胡 峰¹, 孙崇昆¹

(1. 浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300;

2. 浙江兆丰机电股份有限公司, 浙江 杭州 311232)

摘 要: 电动汽车轮毂电机经常要在复杂的运行工况和恶劣环境下运行, 导致轮毂电机电流和内部电磁损耗不断发生变化, 对电机温升分析和可靠运行产生严重影响。以 1 台 4 kW 轮毂电机为例, 利用 Maxwell 电磁有限元分析软件, 建立轮毂电机的电磁有限元模型并对电磁场进行计算。通过选取加速和过载中常见的 8 种工况进行计算, 分析了轮毂电机各部件的电磁损耗分布状态和数值变化规律。由分析结果可知, 定子铁耗随转速的上升而增加, 随过载倍数增加的变化不大; 转子产生的铁心损耗可以忽略不计; 永磁体涡流损耗同时随着加速和过载的增加而增加, 但加速工况产生的影响更强; 绕组铜耗主要受过载倍数变化的影响, 占总损耗的比重最大, 是主要热源。研究结果为轮毂电机温度场的分析和冷却结构的设计提供重要的参考依据。

关键词: 轮毂电机; 电磁损耗分析; 分布状态; 变化规律

中图分类号: TM 301.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)08-0059-06

Analysis of Electromagnetic Loss Characteristics of Electric Vehicle In-Wheel Motor Based on Maxwell*

ZHANG Qi¹, LEI Liangyu^{1,2}, LIU Guohui¹, HU Feng¹, SUN Chongkun¹

(1. School of Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China;

2. Zhejiang Zhaofeng Mechanical and Electronic Co., Ltd., Hangzhou 311232, China)

Abstract: Electric vehicle in-wheel motor often operated in complex operating conditions and harsh environments, resulting in constant changes of the current and internal electromagnetic losses of in-wheel motor. The serious impact on the motor temperature rise analysis and reliable operation had happened. Taking a 4 kW in-wheel motor as an example, using Maxwell electromagnetic finite element analysis software, the electromagnetic finite element model of the in-wheel motor was established, and the electromagnetic field was calculated. By choosing eight common working conditions of acceleration and overload, the distribution of electromagnetic losses and the law of numerical variation of each component of in-wheel motor were analyzed. From the analysis results, it could be seen that the stator iron loss increased with the increase of rotational speed, but did not change with the increase of overload multiple. The core loss of rotor could be neglected. The eddy current loss of permanent magnet increased with the increase of acceleration and overload at the same time, but the effect of acceleration condition on it was stronger. The copper loss of windings was mainly affected by the change of overload multiple, which accounted for the largest proportion of total loss and was the main heat source. An important reference for the analysis of temperature field and the design of cooling structure of in-wheel motor was provided.

Key words: in-wheel motor; electromagnetic loss analysis; distribution state; variation law

* 基金项目: 2013 年杭州市重大科技创新项目(201320110A24)

作者简介: 张 琪(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机设计与研究。

雷良育(1966—), 男, 教授, 博士后, 硕士生导师, 研究方向为机电检测与控制技术、车辆试验技术、电动汽车技术。

0 引 言

电动汽车用轮毂电机的运行工况比传统工业用电机的工况要更加复杂,除了在额定工况下运行外,还要具有一定的过载和扩速的能力来满足爬坡和高速行驶等工况,并且电动汽车用轮毂电机由于特殊的安装位置、自身严格的密封要求和紧凑的结构,比其他工业用电机的散热条件更差^[1-2]。温度过高时会使电机烧毁,严重影响轮毂电动汽车行驶稳定性^[3-4]。由于电机运行时产生的热量主要来源于电磁损耗,电磁损耗的变化特性决定着电机温升的快慢和具体数值^[5-6]。因此,对轮毂电机电磁损耗的数值大小、分布区域和变化规律进行准确的分析具有重要的研究价值。

本文以 1 台 4 kW 轮毂电机为例,建立了该电机的电磁分析有限元模型并对电机的电磁场进行计算。选取平路加速行驶的 4 种工况和过载爬坡行驶的 4 种工况,即对 8 种工况进行损耗的分析和计算。由此得出轮毂电机整体损耗的具体数值和变化规律,为电机的温度场分析和温升特性变化规律分析提供了重要的参考依据。

1 轮毂电机的基本参数和有限元模型的建立

本文所研究的 4 kW 轮毂电机的基本参数如表 1 所示。该电机为外转子永磁同步电机,在 Maxwell 有限元分析软件中建立电磁分析模型时需要对电机实际的模型结构进行简化。

表 1 电机基本参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	4
额定电压/V	72
额定转矩/(N·m)	60
额定转速/(r·min ⁻¹)	550
磁极数	22
定子槽数	21
定子厚度/mm	39.2
转子外径/mm	297.8
转子内径/mm	270
定子外径/mm	268
气隙长度/mm	1
永磁体材料	钕铁硼(NdFeB)
永磁体厚度/mm	5
极弧系数	0.92

- (1) 去掉对电磁场分析影响不大的相关模型,如电机轴、壳体和绝缘材料;
- (2) 只保留对电磁场分析有影响的主体部分,即电机定子铁心、转子、永磁体和定子绕组;
- (3) 定子绕组简化成导条形式。

根据外转子电机的实际工作形式,给电机施加相应的转速和负载,再设置对应的边界条件和电源激励,然后赋予电机各部分的材料属性,从而建立电机电磁场有限元分析模型,如图 1 所示。

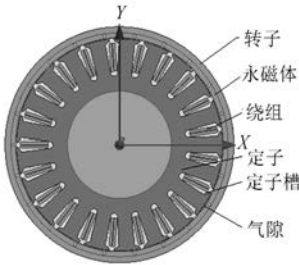


图 1 电机电磁仿真模型

2 轮毂电机铁耗分析

轮毂电机铁耗由定、转子铁心在交变磁场中产生。电机铁心损耗主要由磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗组成,其中铁耗在电机损耗中所占比例较大,是电机的主要损耗之一。目前对铁耗的计算主要采用的是 Bertotti 等提出的铁耗分离理论^[7]。该理论根据铁耗产生方式的不同,将铁耗分开计算,然后再进行叠加求出总损耗。铁心损耗分离理论的铁耗计算方法^[8]为

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_{ex} =$$
$$k_h f B_m^2 + k_e f^2 B_m^2 + k_{ex} (f B_m)^{3/2} \quad (1)$$

式中: P_{Fe} ——总铁心损耗;

P_h ——铁心磁滞损耗;

P_e ——铁心涡流损耗;

P_{ex} ——铁心附加损耗;

k_h ——磁滞损耗系数;

f ——交变电流频率;

B_m ——电机磁场磁密幅值;

k_e ——涡流损耗系数;

k_{ex} ——附加损耗系数。

2.1 额定工况下轮毂电机铁耗分析

2.1.1 额定工况下的电磁场分析

为了计算轮毂电机在额定工况下的铁心损

耗,必须对电机额定工况下的电磁场进行准确的分析,利用有限元分析工具准确地分析出磁场的分布状态。额定工况下的磁场分布云图如图 2 所示。

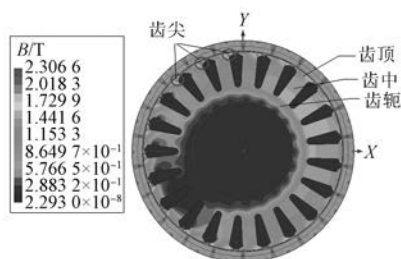


图 2 额定工况下的磁场分布云图

由图 2 可以看出,额定工况下定子齿顶部位的磁通密度较大,在齿尖部位还会出现磁密大于 2.3 T 的轻微饱和现象,原因是电机带负载运行时,定子线圈通电产生电枢反应,使得磁场产生畸变,最靠近永磁体的定子齿顶部分磁密变化较大,局部会产生饱和现象。齿中的磁密幅值分布较均匀,没有出现饱和现象,齿轭的磁密幅值最小。

2.1.2 额定工况下的铁耗分析

电机铁耗主要由铁耗系数、磁密幅值和磁场交变频率引起的。图 3 所示为轮毂电机稳定运行时的额定工况下定子和转子铁损分布云图。从图 3(a)可以看出,定子损耗最大部位出现在齿顶,从定子外圈齿顶部位向内的轭部逐渐变小。原因是齿顶部位磁密较大,而轭部的磁密分布较小,所

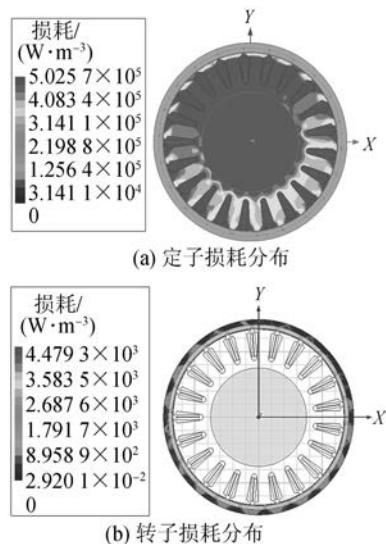


图 3 额定工况下定子和转子铁损分布云图

以损耗也较小,齿中的损耗大小介于两者之间。从图 3(b)可以看出,电机稳定运行时转子铁心损耗也是分布在磁密较大部位。

由图 4 的定、转子铁耗变化曲线可知,额定工况下轮毂电机定子总的铁耗达到了 45 W,而转子的铁耗则为 200 mW,转子铁耗仅为定子的铁耗的 0.89%,转子侧的铁耗特别小。这是由于转子铁心磁通交变的频率较小,仅为 0.34 Hz,因此,在额定负载运行时,转子铁心的损耗占总铁耗的比重非常小,可以忽略不计。

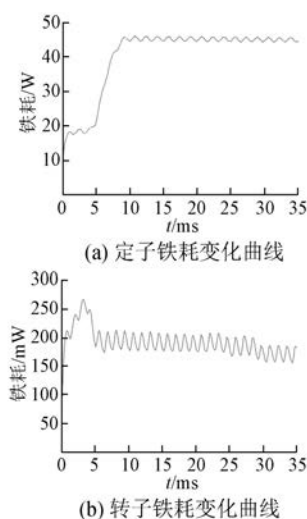


图 4 额定工况下定转子铁耗变化曲线

2.2 8 种工况下铁耗计算与分析

经仿真计算,转子铁心在各个工况下的损耗均非常小,可以忽略不计,因此仅计算定子铁心在各个工况下的总损耗即可。其中,平路加速行驶工况是在负载不变的情况下只有转速改变,而超载爬坡的工况是在转速不变的情况下只有负载改变。经过计算分析可得 8 种工况下的轮毂电机定子铁耗,计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知,在电机转速较低时,电机定子铁心损耗值较小,定子铁心损耗随转速的增加而增加,变化较为明显,但受过载倍数变化的影响较小,数值基本没有变化。这是由于定子铁心损耗主要受磁密交变的频率、磁密和铁心质量的影响。转速变化引起的磁密交变频率的变化对铁心损耗的影响较大,而过载时的大电流会引起磁场电枢反应,进而产生的磁密变化对定子铁心铁耗影响较小,因此变化幅度较小。

表 2 8 种工况下轮毂电机定子铁耗计算结果 W

工况种类	定子铁耗
0.3 倍转速	16.5
0.7 倍转速	27.3
1.0 倍转速	45.0
1.3 倍转速	65.7
1.2 倍负载	45.4
1.5 倍负载	45.9
1.8 倍负载	46.2
2.0 倍负载	46.3

3 轮毂电机永磁体涡流损耗分析

3.1 永磁体涡流损耗的计算原理

因为永磁同步电机是利用脉冲宽度调制 (PWM) 的方法进行供电驱动的, 所以供电时会产生电流的空间和时间谐波, 使永磁体中产生涡流损耗; 并且定子开槽口引起的气隙磁导变化、绕组磁动势的非正弦分布也会使永磁体中产生涡流损耗。就损耗来源来说, 时间电流谐波引起的永磁体损耗占有绝大部分, 而其他原因引起的损耗所占比例相对较小^[9]。永磁体涡流损耗的计算公式为

$$P_e = \int_0^{V_m} \frac{|J|^2}{2\sigma} dv$$

(2)

式中: V_m ——永磁体的体积;
 J ——永磁体的电流密度幅值;
 σ ——永磁体的电导率。

3.2 永磁体涡流损耗的仿真计算

对额定工况下的永磁体涡流损耗进行分析, 截取轮毂电机稳定运行时某一时刻的永磁涡流损耗的分布如图 5 所示。通过仿真软件后处理模块计算所得的额定工况下永磁体的涡流损耗变化曲线如图 6 所示。

从图 5 可知, 永磁体的涡流损耗主要分布在

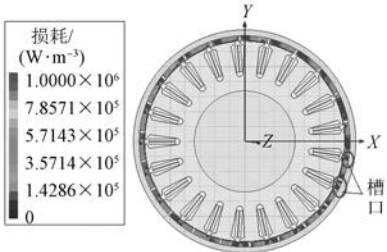


图 5 额定工况永磁体涡流损耗分布云图

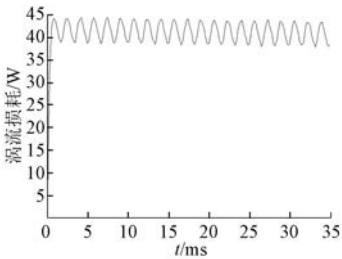


图 6 额定工况下永磁体涡流损耗变化曲线

电机定子槽口对应区域, 因为定子齿槽效应, 磁场会产生气隙磁场分布不均匀和磁场高次谐波等现象, 从而在靠近槽口的永磁体区域产生较高的损耗分布, 所以减小槽口是减小永磁体涡流损耗的最有效方法之一。

由图 6 的涡流损耗变化曲线可知, 轮毂电机稳定运行时额定工况下的永磁体涡流损耗平均值为 42 W。

3.3 8 种工况下永磁体涡流损耗计算与分析

经过计算得到了永磁体在不同工况下涡流损耗的变化曲线, 如图 7、图 8 所示。

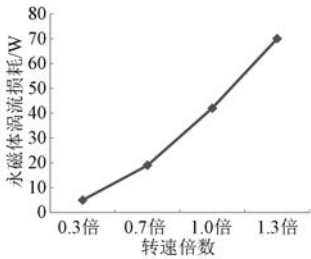


图 7 不同转速倍数下永磁体涡流损耗变化曲线

图 7 为不同转速倍数下永磁体涡流损耗变化曲线, 图 8 为不同过载倍数下永磁体涡流损耗变化曲线。可知永磁体的涡流损耗不仅随着转速倍数增加而增大, 也随着过载倍数的增加而增加, 最大损耗达到 130 W。

过载产生的永磁体涡流损耗总量比转速变化

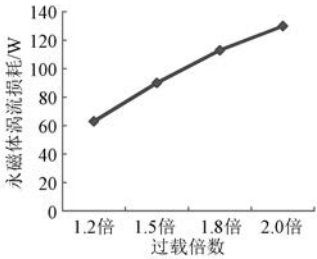


图 8 不同过载倍数下永磁体涡流损耗变化曲线

产生的永磁体涡流损耗总量要大,但是增速引起永磁体涡流损耗的增长速度要大于过载引起涡流损耗的增长速度,因此永磁体涡流损耗受转速增大的影响较大,速度较快时,永磁体温升会增快。

4 8种工况下的轮毂电机绕组铜耗分析

电机在运行时绕组内产生的损耗又称为铜耗,是由电机绕组中存在内阻而引起的功率损耗。永磁同步电机铜耗包括基本铜耗和附加损耗^[10]。本次研究的轮毂电机是三相对称绕组,每相绕组的电流和电阻相同,则电机基本铜耗的计算公式为

$$P_{Cu} = 3I^2R \tag{3}$$

式中： I ——电机绕组的相电流；

R ——每项绕组的相电阻。

绕组中的附加损耗主要由交变磁场、漏磁场和谐波磁场所引起。由于电机在运行时的交变磁场使导体中的电流分布不均匀,产生趋肤效应,电流集中在导体表面薄层中,导体表面电流密度增大,导体电阻增加,从而导致损耗功率也增加。绕组中的附加损耗计算复杂且数值较小,故对于中小型电机通常不做详细计算。

轮毂电机在额定负载情况下,转速倍数的增加对绕组铜耗的影响较小,基本与1.0倍转速工况下的绕组铜耗相同,如表3所示;而轮毂电机在过载情况下,电机需要大电流驱动,电机损耗与绕组电流成平方倍数关系,故电机铜耗的数值会有显著的增加。当电机以2.0倍负载运行时,铜耗达到283.43 W,电机如果长时间在大过载倍数下工作,势必会造成绕组铜耗过大,电机温升过高而影响电机的综合使用寿命。

表3 8种工况下绕组铜耗计算结果 W

工况种类	绕组铜耗
0.3倍转速	87.00
0.7倍转速	87.20
1.0倍转速	87.51
1.3倍转速	87.60
1.2倍负载	87.48
1.5倍负载	125.97
1.8倍负载	196.83
2.0倍负载	283.43

5 轮毂电机整体损耗计算结果分析

对电动汽车2种典型运行工况下的电机各部分电磁损耗进行分析后,将所得的损耗数据以柱状图直观地表示出来,以观察各部分损耗变化规律并进行对比研究,如图9和图10所示。

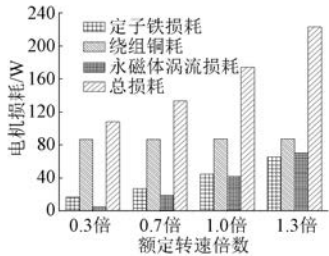


图9 平路加速工况电机损耗数值分布

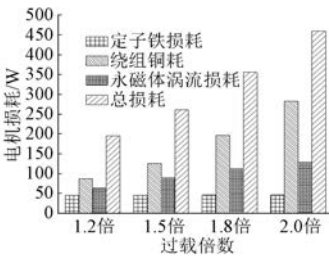


图10 过载爬坡工况电机损耗数值分布

由图9可知,电动汽车在平路定速工况下行驶时,电机处于恒转矩工作区,转矩和电流近似成正比,所以由驱动电流引起的绕组铜耗随转速增加基本不变,维持在约87 W。电机铁心损耗和永磁体涡流损耗随着转速的增加而增加,但这两者的最大值比相应的绕组铜耗小。电机在平路加速工况下的最大总损耗是在1.3倍数转速下,其值为223.3 W。

由图10可知,电动车处于过载爬坡工况下行驶时,电机处于转矩过载状态,为了输出较大转矩,需要较大的驱动电流,但会引起电机铜耗的急剧上升。2.0倍过载时电机的铜耗已经达到了283.43 W,损耗数值较大,引起了绕组温升急剧上升。定子铁耗受过载倍数变化的影响较小,基本保持不变。永磁体涡流损耗根据过载倍数的增加而增加。当电机处于2.0过载倍数下运行时,电机总损耗数值高达459.73 W,是平路加速工况下行驶的最大损耗的两倍以上,较大的过载倍数引

起的损耗过高,势必会造成较大电机温升,从而减少电机的使用寿命,因此在电机温升分析和冷却设计时应该着重考虑绕组产生过高温度的解决方法。

6 结 语

本文以 4 kW 电动汽车用轮毂电机样机为例,建立了电磁仿真有限元模型,分析了额定工况下轮毂电机电磁场分布状态,并以平路加速工况下的 4 种工况和爬坡过载下的 4 种工况为研究基础,研究了轮毂电机各部件的电磁损耗分布状态和数值变化规律,得出以下结论:

(1) 轮毂电机的铁心损耗主要来源于定子铁耗,转子铁耗过小,只占定子铁耗的 0.89%,可以忽略不计。定子齿顶区域的损耗较大,齿中和齿轭区域的损耗较小,主要是受磁场分布区域的影响。定子铁耗随转速上升而上升,因为定子铁耗主要受磁场交变频率的影响,但是受过载倍数上升的影响较小。

(2) 永磁体的涡流损耗同时跟随转速倍数和过载倍数的增加而增加。涡流损耗主要集中在定子槽口区域,减小槽口尺寸是降低涡流损耗的有效方法。过载产生的永磁体涡流损耗总量比转速变化产生的永磁体涡流损耗总量大,但转速增加引起的涡流损耗的增加速度更快。

(3) 绕组铜耗受过载倍数增加的影响较大,因为过载倍数的增加引起驱动电流的增加,使得绕组内阻产生的铜耗是以电流二次方的速度在增加,所以增长较快。绕组铜耗在轮毂电机总的电磁损耗所占比例较大,是主要热源,因此在后期轮

毂电机冷却结构设计时需着重考虑绕组位置的冷却方式。

【参 考 文 献】

- [1] 李勇,徐兴,孙晓东,等.轮毂电机驱动技术研究概况及发展综述[J].电机与控制应用,2017,44(6): 1.
- [2] 崔剌楷,程文杰,肖玲,等.10 kW 超高速永磁电机三维瞬态温度场计算[J].电机与控制应用,2018, 45(2): 90.
- [3] 张文,郑晓钦,吴新振.多相感应电机三维电磁分析与损耗计算[J].电工技术学报,2018,33(增刊2): 331.
- [4] 安忠良,徐作为,兰玉华,等.异步起动永磁同步电机铁耗分析及计算[J].微电机,2016,49(5): 6.
- [5] 张洪亮.永磁同步电机铁心损耗与暂态温度场研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [6] 李立毅,张江鹏,闫海媛,等.高功率密度电机三维温度场计算及导热优化研究[J].中国电机工程学报,2016,36(13): 3642.
- [7] 孙晓波,孟大伟,杨小妮.对旋风机叶轮转矩脉动对电机损耗和效率影响[J].电机与控制学报,2018, 22(9): 40.
- [8] 唐任远.现代永磁电机:理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2000:18-19.
- [9] 江从喜,赵兰萍,杜旭之,等.基于整车工况的电动汽车轮毂电机散热分析[J].中国机械工程,2016, 27(13): 1839.
- [10] 王晓远,贾珍珍,高鹏.外转子轮毂电机电磁场-温度场的耦合求解分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47(10): 898.

收稿日期: 2019-03-26

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部