

外笼型转子磁力耦合器温度场分析^{*}

葛研军, 于 涵, 马雪祺, 龙 威, 王 鹏
(大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 针对现有笼型转子散热条件差, 永磁体易退磁等缺点, 提出一种外笼型转子磁力耦合器 (OSRMC)。基于 OSRMC 组成结构及运行原理, 给出其热分析模型及损耗原理, 并依此论证了 OSRMC 在转差为 33.3% 时, 其所产生的热功耗最大 (为 4/27 倍的额定功率)。基于传热学原理, 给出了 OSRMC 两种主要的热量交换方式及导热微分方程, 并基于集群解析法与区域剖分法得到了 OSRMC 的有限元法仿真结果。结果表明: OSRMC 的主要换热方式为热对流, 其主要温升位于笼条与永磁体的耦合处并沿轴向逐渐降低; 集群解析法与区域剖分法计算精度相当, 但区域剖分法计算速度较快, 网格划分难度较大。

关键词: 磁力耦合器; 外笼型转子; 温度场计算; 集群解析法; 区域剖分法
中图分类号: TH132 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)11-0074-06
doi: 10.12177/emca.2023.140

Analysis of Temperature Field of Outer Cage Rotor Magnetic Coupler^{*}

GE Yanjun, YU Han, MA Xueqi, LONG Wei, WANG Peng
(School of Mechanical Engineering, Dalian Jiao Tong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of poor heat dissipation condition of cage rotor and easy demagnetization of permanent magnet, an outer squirrel cage rotor magnetic coupler (OSRMC) is proposed. Based on the composition and operation principle of OSRMC, the thermal analysis model and loss principle are given, and it is demonstrated that when the slip of OSRMC is 33.3%, the generated thermal power consumption is the maximum (4/27 times of the rated power). Based on the principle of heat transfer, the two main heat exchange modes and the differential equation of heat conduction of OSRMC are given, and the finite element simulation results of OSRMC are obtained based on the cluster analysis method and the domain partitioning method. The results show that: the main heat exchange mode of OSRMC is thermal convection, and its main temperature rise is located at the coupling between the cage and the permanent magnet and gradually decreases along the axial direction. The calculation accuracy of cluster analysis method is equivalent to that of area division method, but the calculation speed of area division method is fast and the grid division is more difficult.

Key words: magnetic coupler; outer cage rotor; calculation of temperature field; cluster analysis method; area division method

0 引 言

磁力耦合器 (MC) 是一种磁力传动装置, 具有无机械连接传递动力的优点^[1], 其主要由内、外转子及气隙构成。MC 一般可分为盘式和筒式两

种类型^[2]。
盘式磁力耦合器 (简称盘式耦合器) 的优点是轴向长度小, 结构紧凑^[3], 缺点是其通过两盘之间的间隙调速, 由于间隙的磁阻非常大, 因此调速效率及稳定性不高^[4]。

收稿日期: 2023-06-22; 收到修改稿日期: 2023-07-24
^{*} 基金项目: 辽宁省教育厅自然科学研究重点攻关项目 (JDL2020001); 大连市科技创新基金项目 (2018J12SN071)
作者简介: 葛研军 (1964—), 男, 教授, 研究方向为磁力传动与驱动。
于 涵 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型动力机械。(通信作者)

筒式磁力耦合器(简称筒式耦合器)能有效克服上述盘式耦合器的缺点,具有调速效率及执行效率双高的特征^[5]。

筒式耦合器可分为铜套式及笼型转子式两种^[6]。其中铜套式耦合器的电气隙长度大,额定运行时的转差也较大,执行效率没有笼型转子式高^[7]。

笼型转子式耦合器虽然运行效率高,但其鼠笼一般为内置式,当转差较大时内部笼条所产生的热量不能有效散出^[8],因此本文提出一种外笼型转子磁力耦合器(OSRMC),其将引起主要热功耗的笼条置于外笼转子轭铁中,并在满足轭铁导磁性能的前提下,尽可能地减小轭部高度以形成较短的热传导回路,便于笼条内部热量的散出。另外,OSRMC 内转子为采用铁辐轴中空式结构的永磁转子,当其旋转时内部将形成旋转空气流,可将外部冷空气引入,使其在内转子以及由内转子和外转子所形成的空气隙中流动,从而带走永磁转子产生的热量。

上述结构虽然可将 OSRMC 在额定工作条件下的热功耗散出,但当转差较大时笼条也会产生大量热功耗,并且永磁体也会受到二次谐波的影响从而产生闭合的涡电流,加之内、外转子轭铁所形成的铁心损耗,OSRMC 内部仍会产生较大温升,进而造成永磁体不可逆退磁,使 OSRMC 工作状态失效。

为此,本文针对温升对 OSRMC 关键构成部件造成损害的问题,基于集群解析和区域剖分两种理论方法,分别建立有限元模型,采取不同分析单元剖分方法,对 OSRMC 温度场进行分析。结果表明:当迭代次数大于 800 时,两种分析方法所得出的永磁体温度变化曲线具有高度一致性,同时也验证了 OSRMC 温度有限元模型的准确性。

1 OSRMC 运行原理

OSRMC 机械结构示意图如图 1 所示。图中,外转子(鼠笼转子)与负载相连,内转子(永磁转子)与动力源相连。当动力源带动永磁体旋转时,永磁体将形成可切割笼条的旋转磁场并在笼条中产生感生电流及感生磁场,感生磁场与永磁体磁场相耦合,即可形成输出轴所需的负载转矩。

图 1(a)为 OSRMC 的额定工作状态,此时内

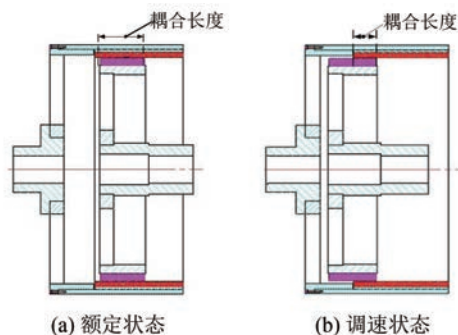


图 1 OSRMC 机械结构

外转子之间的转差很小,执行效率最高;图 1(b)为 OSRMC 的调速工作状态,此时内外转子的轴向耦合长度较额定状态小,因此要得到负载所需的电磁转矩,就必须加大内外转子之间的转差,从而实现内转子(或负载)的调速要求。图 2 为建立的 OSRMC 三维模型。

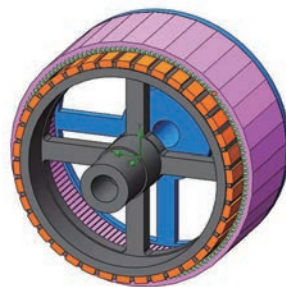


图 2 OSRMC 三维模型

2 OSRMC 温度场分析

2.1 热功耗形成原理

设图 1 中与动力源相连接的永磁转子以 n_1 恒转速旋转,其所对应的与负载相连接的外转子转速为 n_2 ,则内、外转子的转差为 $(n_1 - n_2)$,其所对应的转子感生电流的交变频率 f_2 及感生电动势 E_{2s} 分别为

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = sf_1 \quad (1)$$

式中: p 为极对数; $f_1 = \frac{pn_1}{60}$ 为永磁转子的磁通交变

频率; $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ 为内、外转子的转差率。

$$E_{2s} = BLv = 2BL\tau sf = sE_2 \quad (2)$$

式中: B 为永磁体形成的气隙磁通密度; L 为内、外转子的耦合长度; E_2 为外转子静止时的笼条感

生电势; $v = \pi d(n_1 - n_2)/60$ 为气隙磁场对笼条的切割线速度; $\tau = \pi d/2p$ 为永磁体极距。

由式(2)可知, OSRMC 运行时所产生的感生电势等于鼠笼转子静止时的感生电势与转差率 s 的乘积, 且感生电势及电流随转差率的增大而增大。由于热损耗与感生电势成正比, 因此调速(尤其是转差较大)时 OSRMC 的发热量将急剧上升。

2.2 热传递过程

由图 1 所示的 OSRMC 运行原理及结构特点可得图 3 所示的热传递过程。

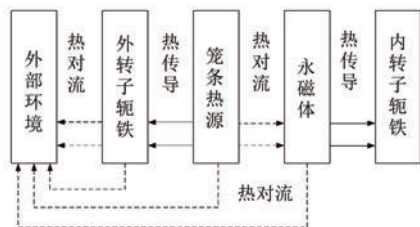


图 3 热传递过程

2.3 涡流损耗分析

设与动力源相连的内转子输入转矩及转速分别为 T_1 和 n_1 ; 与负载端相连的外转子输出转矩及转速分别为 T_2 和 n_2 。由异步电机转差形成原理可得 OSRMC 热功耗 ΔP_s 表达式为

$$\Delta P_s = \frac{T_1 n_1 - T_2 n_2}{9550} \quad (3)$$

在离心式负载工况下, OSRMC 正常运行时内、外转子端的转矩存在如下关系:

$$\begin{cases} T_1 = T_2 = T_e \\ \left(\frac{n_2}{n_N}\right)^2 = \frac{T_e}{T_N} \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_e 、 n_N 、 T_N 分别为 OSRMC 的电磁转矩、额定转速及额定转矩。

将式(4)代入到式(3)中, 可得出:

$$\Delta P_s = \frac{T_e(n_1 - n_2)}{9550} = \frac{T_N n_1^3}{9550 n_N^2} (s^3 - 2s^2 + s) \quad (5)$$

额定状态下 OSRMC 的 n_1 与 n_N 差值很小, 则式(5)可简化为

$$\Delta P_s = P_N (s^3 - 2s^2 + s) \quad (6)$$

式中: P_N 为额定功率。

对式(6)取极值, 可知, 当转差 $s = 1/3$ 时, ΔP_s

取最大值为

$$\Delta P_s = \frac{4}{27} P_N \quad (7)$$

3 导热微分方程及分析方法

3.1 导热微分方程

由于 OSRMC 的所有组件均不能产生电磁波, 因此其主要传热方式为热对流与热传导。

热传导基本定律为

$$\mathbf{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial \mathbf{n}} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{q}$ 为热源密度; $\mathbf{n}$ 为单位法向量; λ 为导热系数; $\partial t / \partial \mathbf{n}$ 为温度梯度。

温度有差异的流体介质间由于位移变化而引起的热量传递方式称为热对流, 可表示为

$$q = \alpha \Delta t \quad (9)$$

式中: q 为流体介质流经固体表面的热流密度; Δt 为流体介质温度与固体表面之间的温度差; α 为流体与固体之间的对流换热系数。

傅里叶定律可表达单元内某一位置温度场的热流密度与温差之间的内部联系, 但无法明确地表达导热时物体某一单元内的温度与时间之间的变化关系。因此可将其与能量守恒定律联立对导热微分方程求解, 即

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} t) + q_v \quad (10)$$

式中: ρ 为密度; c 为比热; τ 为时间; λ 为导热系数; q_v 为内热源。

其中, $\text{div}(\lambda \text{grad} t)$ 在直角坐标系中可表示为

$$\text{div}(\lambda \text{grad} t) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$\text{div}(\lambda \text{grad} t)$ 在三维坐标系下可以表示为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (12)$$

式中: λ 、 ρ 、 c 可以是常量, 也可以是关于温度的函数; 对于 OSRMC, ρ 、 c 为常量, 假设 OSRMC 材料的导热系数不随温度的变化而变化, 即 λ 也为常量。

则 $\text{div}(\lambda \text{grad} t)$ 可表示为

$$\text{div}(\lambda \text{grad} t) = \lambda \nabla^2 t \quad (13)$$

由式(13)可得导热物体内部任意一点的导热微分方程为

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{14}$$

式中： κ 为热扩散率，且 $\kappa = \lambda / \rho c$ 。

对于直角坐标系有

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \tag{15}$$

将式(15)带入到式(14)中，可得：

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\lambda} \tag{16}$$

式(16)为常用的导热微分方程，因为 OSRMC 为内部热源稳态导热，故有 $\partial t / \partial \tau = 0$ ，则 OSRMC 的导热微分方程可以表示为

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \tag{17}$$

式(17)在直角坐标系下的表达式为

$$\frac{q_v}{\lambda} = - \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \tag{18}$$

式(18)的解析值即为 OSRMC 内部任意一点的温度值。

3.2 有限元仿真及热分析方法

取 OSRMC 传递功率为 2 000 kW，由其电磁传动模型可得表 1 所示的基本结构参数。

表 1 OSRMC 基本结构参数		mm
参数名称	参数值	
内轭铁内表面半径	508	
内轭铁外表面半径	612	
外轭铁内表面半径	617	
外轭铁外表面半径	660	
轴向长度	500	

由式(7)可知当转差为 1/3 时，OSRMC 的热功耗最大值为 296.3 kW。

图 4 为采用有限元方法得到的 OSRMC 热功耗。可知，当 OSRMC 转差为 1/3 时其所对应的热功耗约为 0.3 MW，与式(7)所得的理论计算结果相差约 1.3%，验证了式(7)的正确性。

为验证已建立的 OSRMC 模型的可行性，本文基于有限元分析软件的网格划分方法提出 OSRMC 热功耗的两种分析方法。

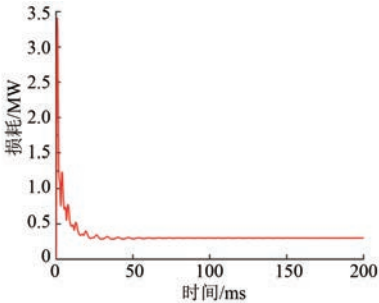


图 4 OSRMC 涡流损耗

(1) 集群解析法：将 OSRMC 视为一个整体然后再进行单元解析，并基于曲率进行固体单元与流体单元的划分。由于所分析的单元分布相对均匀，因此计算量较大。

(2) 区域剖分法：针对 OSRMC 组成结构进行区域划分，对其构成部件及最小缝隙尺寸采取更高精度的剖分；该方法的分析单元分布不均以达到不同区域的分析量存差，可优化计算量。

由于划分区域网格的分布稀疏不定且划分的过程中会出现空隙，为确保上述两种方法的网格划分差异不大，可将两者基础网格设置一致来进行温度场分析。

4 OSRMC 温度场计算结果分析比较

采用上述的两种有限元分析方法对 OSRMC 进行热分析计算，可得两种分析方法下的 OSRMC 外轭铁及笼条的温度云图，如图 5 和图 6 所示。

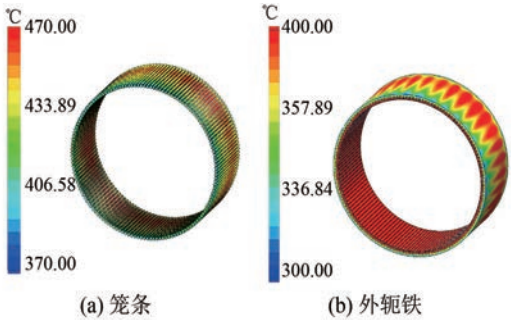


图 5 OSRMC 集群解析法的温度云图

由图 5(a) 与图 6(a) 可知，笼条作为 OSRMC 的体积热源，其温度最高且分布不均。这是因为内、外转子之间的径向气隙长度较小，内、外转子高速旋转时气隙间所形成的气压相对较低，使热

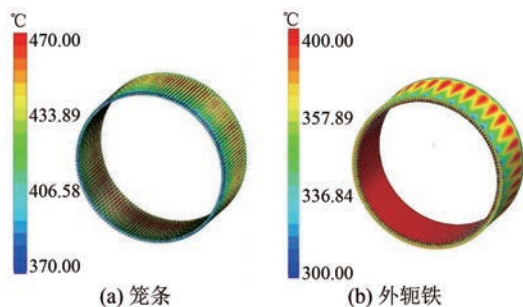


图6 OSRMC 区域剖分法的温度云图

量高的空气不易从 OSRMC 内部排出,而未处于耦合状态笼条处的空气流动空间较大,高热气体较易排出,因此导致图 5(a)及图 6(a)所示的温度分布不均(即与永磁体耦合处的温度较高,而距耦合较远处的温度较低)。

与图 5(a)及图 6(a)类似,图 5(b)及图 6(b)所示外转子铁温度也不均匀,其与永磁体耦合处的温度最高并沿轴向逐渐降低。这是因为外转子铁与空气接触面积较大且与外部环境的换热方式为热对流,当外转子铁高速旋转时空气的流动速度较快,换热效率高,使其温度低于笼条温度。

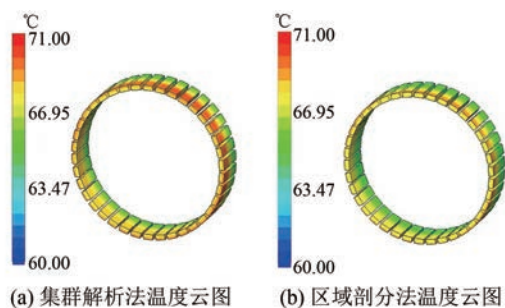


图7 OSRMC 永磁体温度云图

图 7(a)与图 7(b)分别为采用集群解析法、区域剖分法所得的永磁体温度云图。可见,永磁体温度分布与笼条温度分布相似,也是因为耦合部分气隙空间小,空气流通不易而导致耦合部分温度最高且沿轴向逐渐降低。对比上述两种分析方法所得的结果可知,采用区域剖分法所得的计算结果比集群解析法略高,但总体温度分布趋势相同,均由耦合处沿轴向逐渐降低。为此,本文仅分析 OSRMC 中对温升最为敏感的永磁体温度变化曲线。

图 8 为 OSRMC 的永磁体温升曲线。由图 8 可知,当将永磁体作为 OSRMC 温度场分析的收

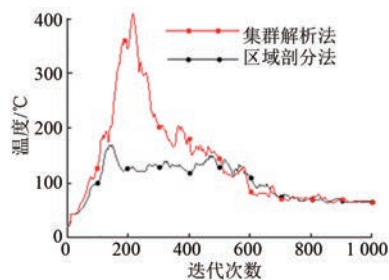


图8 OSRMC 永磁体温升曲线

敛参数目标时,随着迭代次数的增加,两种方法分析所显示出的温度均为先增加后逐渐收敛并趋于稳定趋势,这是由于初始阶段热量由笼条通过热对流的方式传递到永磁体上,使永磁体温度迅速上升。

图 8 中,采用集群解析法迭代 1 000 次所用的 CPU 响应时间为 10^5 s,而区域剖分法则为 2.3×10^4 s,用时仅为集群解析法的 23%。这是因为区域剖分法仅对关键部件进行高精度网格剖分,而集群解析法则对所有构成部件的网格精度权重相同。另外,采用集群解析法所得的温升曲线有较大峰值,而区域剖分法则相对平缓然后收敛。总体而言,集群解析法和区域剖分法所得的温升曲线均收敛且计算结果基本一致,证明了两种分析方法均具有较好的可行性及可靠性。

5 结 语

(1) OSRMC 的主要传热方式为热传导与热对流。其中,外转子铁与笼条,永磁体与内转子铁间的热传递方式为热传导;而笼条、永磁体与气隙间,笼条、永磁体、外转子铁、内转子铁与 OSRMC 外界环境间的热传递方式均为热对流。由分析结果可知,OSRMC 主要构成部件的温度均在材料许用温度范围之内,散热能力较内置式鼠笼磁力耦合器更加优异。

(2) 调速状态下 OSRMC 笼条与永磁体耦合处的温升最高,并沿非耦合处的轴向逐渐降低;当调速转差为 $1/3$ 时,其所形成的热功耗最大,为 $4/27$ 倍的额定功率。

(3) 集群解析法和区域剖分法对 OSRMC 温度场的计算结果均正确可靠,且均可用于温度场有限元分析中,但区域剖分法采用对关键部件网格精细划分原则,因此其计算速度比集群解析法

快,但网格划分难度较大。

【参考文献】

- [1] CHEN M, CHAU K T, LEE C H T, et al. Design and analysis of a new axial-field magnetic variable gear using pole-changing permanent magnets [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2015, 153: 23-32.
- [2] JIAN L N, CHAU K T, YU G, et al. Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4526-4529.
- [3] 李啸, 韩雪岩, 朱龙飞, 等. 基于流固耦合模型的永磁耦合器导体铜盘散热研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 58-64.
- [4] WANG J, LIN H, FANG S, et al. A general analytical model of permanent magnet eddy current couplings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(1): 1-9.
- [5] 彭科容. 永磁磁力耦合器结构与特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [6] 葛研军, 袁直, 贾峰, 等. 笼型异步磁力耦合器机械特性与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 68-74.
- [7] 张小锋, 袁爱仁, 吴盈志. 筒式磁力耦合器的结构参数对传动性能的影响[J]. 机械设计与制造, 2019(10): 189-192+196.
- [8] 唐正强, 惠佳博, 周东东, 等. 磁力耦合器空气散热结构设计与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(3): 136-139+143.

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月10日出版,国内外公开发行人,邮发代号4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的

贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。近年还被JST日本科学技术振兴机构数据库(日)和Pж(AJ)文摘杂志(俄)等国外数据库收录。为及时刊载上述技术领域的最新研究动态,推广研发成果,推动研究与应用的紧密结合,欢迎各高校相关课题组及团队和科研技术人员等向本刊投稿,本刊不收取任何版面费或审稿费等费用!

《电机与控制应用》官网: <http://www.motor-abc.cn/djykyz/home>.