

DOI: 10.7652/xjtuxb201406009

新型移相式屏蔽电动机屏蔽套涡流与温升分析

安跃军¹, 张强¹, 李文瑞¹, 师勇²

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 110870, 沈阳; 2. 大连海密梯克泵业有限公司屏蔽电机事业部, 116620, 辽宁大连)

摘要: 针对屏蔽电动机屏蔽套涡流损耗造成温升过高, 影响安全性的问题, 基于消除屏蔽套感应电势的思想, 提出了新型移相式屏蔽电动机结构。通过两个同轴相连的单元异步电动机定子绕组在周向空间上相差一个极距安置, 使两个单元电动机旋转磁场在共用的定子屏蔽套上产生大小相等而方向相反的感应电势, 相互抵消, 从而抑制涡流损耗, 降低屏蔽套温升, 以提高屏蔽电动机的可靠性和安全性。涡流场分析表明: 新型结构屏蔽电动机中屏蔽套上的涡电流密度明显下降, 体现了双段移相式屏蔽电动机屏蔽套上感应电势的抵消作用; 就算例而言, 定子屏蔽套涡流损耗降低了近32%, 由于涡流损耗的降低, 定子屏蔽套的温升得到抑制, 算例屏蔽电动机屏蔽套温升下降了13℃, 其热应力及热膨胀也会随着温度的降低而减小。移相式屏蔽电动机具有工程开发价值, 可为改进当前屏蔽电动机产品的可靠性和安全性提供技术方案。

关键词: 屏蔽电动机; 双段移相式结构; 涡流损耗; 温升

中图分类号: TM301 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)06-0050-05

Eddy Losses and Temperature Rise on Shielded Can in Canned Motor with New Phase-Shifted Structure

AN Yuejun¹, ZHANG Qiang¹, LI Wenrui¹, SHI Yong²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Canned Motor Business Department, Dalian Hermetic Pump CD. LTD., Dalian, Liaoning 116620, China)

Abstract: To solve the excessive temperature rise in shielding sleeve of shielded motor due to eddy loss affecting the security, a new two-cell phase-shifted canned motor structure is proposed following the idea of eliminating induced electromotive force on the shielding sleeve. Two coaxial connected stator windings of unit asynchronous motor are fixed and circumferentially changed a pole pitch in space to produce two equal but opposite induction electromotive forces in the shared stator shielded sleeve, which counteract mutually to suppress the eddy losses, lower temperature rise, and improve the reliability and safety of the shielded motor. The analysis for the eddy current field and temperature field demonstrates that the eddy current density is decreased significantly exhibiting the effect of the counteracted induction electromotive forces in the shielded sleeve, the eddy loss in the shielded sleeve reduces by nearly 32%, the temperature rise is effectively suppressed for the eddy loss reduction, the temperature drops by 13℃, and the thermal stress and thermal expansion are also relieved.

Keywords: canned motor; two-cell phase-shifted structure; eddy loss; temperature rise

收稿日期: 2013-11-14。 作者简介: 安跃军(1962—),男,教授。 基金项目: 辽宁省科技计划资助项目(2010220011);沈阳市科技计划资助项目(F11-190-7-00)。

网络出版时间: 2014-04-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140425.0930.003.html>

在现代介质传输装置中,屏蔽电动机与泵一体化的屏蔽泵具有完全无泄漏、结构紧凑、质量轻和高稳定性等诸多优点^[1]。屏蔽泵的动力核心是屏蔽电动机^[2-4],该电动机是在普通三相异步电动机之上派生而来的。屏蔽电动机与泵构成一个封闭的整体,无需轴封结构,定子内侧和转子外侧各装有一个金属屏蔽套,这样输送的介质可以进入电动机内部而不与定、转子接触^[3],确保定、转子铁心和绕组不受所传输介质的腐蚀,实现安全稳定运行。然而,根据电磁感应定律,处在定、转子之间的金属材质屏蔽套会产生感应电势,涡流损耗过大、屏蔽套温升过高,进而导致屏蔽套起皱、鼓包和破裂而酿成事故,所以抑制屏蔽套涡流、降低电机损耗有利于提高电机的安全性,具有重要意义和实用价值。

1 屏蔽套涡流损耗估算与抑制措施

屏蔽套是分布式导体,涡流在屏蔽套中流通道径不固定,为了估算出屏蔽套涡流损耗,文献[5]在进行一系列假设的情况下,基于导体电阻损耗推导出屏蔽套涡流损耗,表达式如下

$$p = \frac{U_x^2}{R} \tag{1}$$

$$p = \frac{\pi^3 D_x^3 L f^2 B_m^2 \Delta}{2\rho} \tag{2}$$

式中: Δ 为定子屏蔽套的厚度; D_x 为屏蔽套直径; L 为屏蔽套长; f 为气隙磁场的频率; B_m 为气隙磁密最大值; ρ 为屏蔽套材料电阻率。

由式(2)可以看出,屏蔽套涡流损耗与屏蔽套的直径、厚度、长度,气隙磁密和材料电阻率等直接相关。传统抑制屏蔽套损耗的途径如下^[6]。

(1)减少定子铁心内径。屏蔽套损耗 p 与其直径 D_x 的立方成正比,通常的屏蔽电动机将其设计为细长形。

(2)降低气隙磁密。由于定子屏蔽套涡流损耗与气隙磁密 B_m 的平方成正比,通常屏蔽电动机设计时气隙磁密较低,一般为 0.45~0.6 T。

(3)选用强度高、耐腐蚀、电阻率高、导热性能好、焊接性能优的非磁性材料屏蔽套。

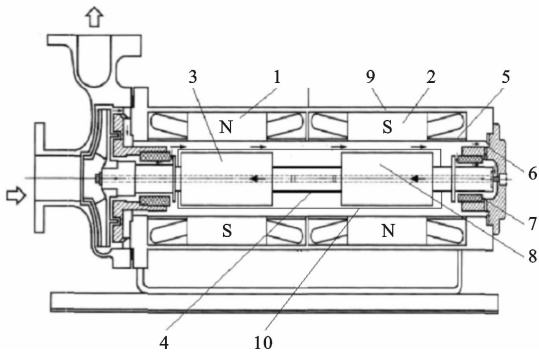
由式(1)可知,产生涡流损耗的根本原因是屏蔽套中产生的感应电势,而传统抑制途径只是被动地降低屏蔽套涡流损耗。本文提出一种目的在于主动根除涡流的新思想,就是消除屏蔽套中的感应电势,构造一种新型双段移相式电动机结构,以便更有效地抑制涡流损耗。

2 新型移相屏蔽电动机

本文提出的双段移相式屏蔽电动机结构如图 1 所示,与传统屏蔽电动机尺寸的对比如表 1 所示。

表 1 双段移相屏蔽电动机与传统屏蔽电动机尺寸对比

样机	额定功率 /kW	极数	定子外径 /mm	定子内径 /mm	铁心长度 /mm	定子屏蔽套长度/mm
双段移相屏蔽电动机	1.5	4	120	75	80+80	300
传统屏蔽电动机	1.5	4	120	75	160	300



1 为单元电动机 a 的定子铁心;2 为单元电动机 b 的定子铁心;
3 为单元电动机 a 的转子铁心;4 为轴;5 为定子屏蔽套;
6 为端盖;7 为轴承;8 为单元电动机 b 的转子铁心;
9 为机壳;10 为转子屏蔽套

图 1 双段移相式屏蔽电动机结构图

新型双段移相式屏蔽电动机主要有以下特点。

(1)双段移相式屏蔽电动机由两个轴向排列、同轴装配的单元电动机构成。

(2)两个单元电动机共用一个定子屏蔽套和一个转子屏蔽套。

(3)两个单元电动机在结构形式和尺寸参数上相同。

(4)两个定子绕组在周向空间上相差一个极距,两个定子绕组接入同一交流电源,在电动机气隙内形成两个强度相同、转速相同、转向相同的旋转磁场,两磁场在屏蔽套上产生大小相等而方向相反的感应电势,可相互抵消。

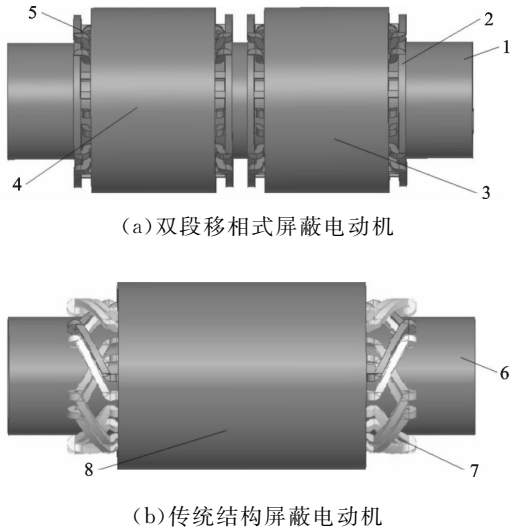
(5)两个转子上产生的电磁转矩大小相等、方向相同,合成转矩驱动屏蔽泵叶轮实现机电能量转换^[2,4]。

3 屏蔽套涡流特性分析

屏蔽套受旋转磁场的切割会产生感应电势进而在屏蔽套内产生涡流,屏蔽套导电具有分布特性,使得涡流路径不会像导线那样被约束在规划好的区域内。所以,屏蔽套涡流大小和路径难以用传统“路”的方法计算和确定。为此,本文利用有限元方法对屏蔽套涡流特性加以计算和分析,也为温度场计算做准备。

根据表 1 的电动机参数,在有限元软件中建立屏蔽电动机模型。为便于涡流损耗的对比,建模时忽略谐波的影响,同时双段移相式屏蔽电动机和传统屏蔽电动机定、转子采用相同的槽形尺寸,屏蔽套也采用相同材质和长度的不锈钢,运用零切向磁场强度边界条件进行有限元分析^[7]。

利用有限元软件建立的双段移相式屏蔽电动机和传统屏蔽电动机三维模型^[8]如图 2 所示。



1、6 为定子屏蔽套;2、3 为单元电动机 I 定子绕组和铁心;
4、5 为单元电动机 II 定子铁心和绕组;7、8 为传统屏蔽电动机定子绕组和铁心

图 2 双段移相式屏蔽电动机与传统屏蔽电动机三维模型 的比较

由于定子屏蔽套中产生的是分布式感应电势,无法得出直观的仿真结果,而涡流是感应电势作用在屏蔽套上形成的,因此可通过电流密度矢量分布间接反映感应电势变化。图 3 是交变磁场在两种结构屏蔽电动机屏蔽套上产生的电流密度的矢量图。从图中可以看出,传统屏蔽电动机屏蔽套上的电密在屏蔽套中间位置最大,电流密度只在两侧端部附近略有下降,且降幅不明显,元件边所对应的中间区域电流密度最高达到 9.7 A/mm²。在双段移相式

屏蔽电动机两套定子绕组之间的一段公共区域内(黑线之间),由于两个极性相反的交流磁场的作用,在导电材质的屏蔽套上产生的感应电势方向相反,感应电流方向也相反。由图 3 可见,公共区域内的一部分电流互相抵消,使电流密度最高值为 7.2 A/mm²。双段移相式屏蔽电动机屏蔽套相对传统屏蔽电动机电流密度的最大值下降了 25.8%。

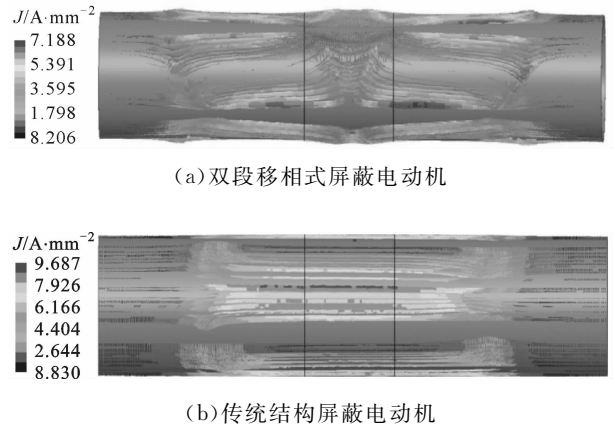


图 3 定子屏蔽套电流密度矢量分布图

屏蔽套涡流损耗与电流密度的关系为^[9]

$$p = \int \frac{|J|^2}{2\sigma} d\Omega \tag{3}$$

式中: J 为电流密度; σ 为电导率; p 为涡流损耗; Ω 为对应介质体积。

由式(3)可知,若屏蔽套电导率不变的话,随 J 减小,涡流损耗以方次比例降低。

两种结构的电动机定子屏蔽套损耗如图 4 所示。从图中可以看出,传统屏蔽电动机涡流损耗平均值约为 282 W,而双段移相式屏蔽电动机定子屏蔽套涡流损耗平均值约为 193 W,减少了 31.6%。

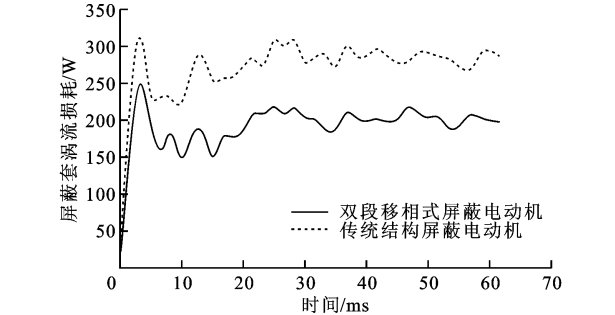


图 4 定子屏蔽套涡流损耗的对比

4 屏蔽套稳态温升分析

屏蔽电动机运行时会产生损耗,这些损耗都会转变为热能,使电动机各部分的温度升高。屏蔽套产生涡流损耗同样会导致屏蔽套的温度升高,该温

升会使屏蔽套产生热变形,起皱甚至破损,安全系数降低。因此,正确计算屏蔽电动机温升情况,不仅可以优化电动机设计,还可以为电动机更高效、更安全地运行奠定坚实的基础。

4.1 温度场数学模型

根据传热学理论^[10],屏蔽电动机内温度场问题可以用三维热传导方程描述

$$\left. \begin{aligned} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q &= c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_1} &= 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_2} &= \alpha(T - T_e) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: T 为温度; q 为热源密度; c 为比热容; γ 为密度; τ 为时间; S_1 为电动机绝热边界面; S_2 为电动机散热边界面; T_e 为 S_2 周围介质的温度($^{\circ}\text{C}$,时间的函数); α 为 S_2 面的散热系数; K 为 S_1 和 S_2 面法向导热系数; K_x 、 K_y 、 K_z 分别为电动机各介质 x 、 y 、 z 方向的导热系数。

4.2 温度场仿真

为方便计算,给出求解区域的基本假设和边界条件如下。

基本假设:只考虑温度的平均效应(即不考虑温度不均匀分布引起电动机电磁性能及热源变化);槽绝缘与槽内空气夹层的热性能参数取二者等效值。

边界条件:由于转子屏蔽套损耗和温升相对于定子屏蔽套很小,在温度场分析中可以忽略,认为定子屏蔽套与气隙之间由空气流动散热;机壳外表面为散热面。

将电磁场有限元分析所得各项损耗赋值,添加各散热面散热系数,建立电动机温度场仿真模型,得到温度场仿真计算结果如图 5 和图 6 所示。

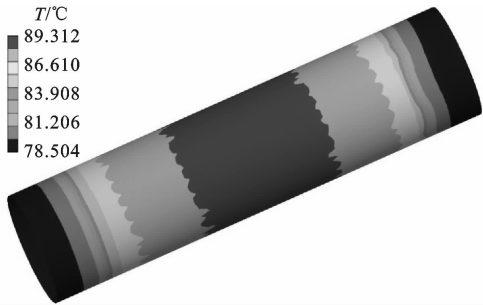


图 5 双段移相式结构屏蔽电动机定子屏蔽套温度分布

从图 5、图 6 可以看出,相对于传统屏蔽电动机,双段移相式屏蔽电动机在额定运行时由于定子屏蔽套损耗减少,使温升得到抑制。定子屏蔽套的



图 6 传统结构屏蔽电动机定子屏蔽套温度分布

热源为定子旋转磁场在其上感应电势所产生的涡流损耗,因此热源区域主要集中在绕组的元件边所对应的区域。对于传统屏蔽电动机,屏蔽套上涡流损耗分布较为均匀,两端由于绕组的端部和端盖之间有间隙而使得一部分热量得以散发。相比较而言,双段移相式结构的屏蔽套热源热量低,导致整体温度低,中间区域由于两套励磁绕组的共同作用,导致温度比两侧高,在定子屏蔽套、铁心和机壳同等长度的情况下,多出的端部使得绕组与机壳之间的空气所占体积减少,因此在两侧很小的一段区域比传统电动机屏蔽套温度略高。

通过图 7 的数据分析可得,传统屏蔽电动机定子屏蔽套平均温度为 100°C ,双段移相式屏蔽电动机定子屏蔽套平均温度为 87°C ,降低了 13°C 。双段移相式屏蔽电动机定子屏蔽套的温升相比传统屏蔽电动机下降很多,同时热应力也会随之减小,而该结构电动机屏蔽套的受热膨胀及热变形会得到抑制。在工程实践中,采用此结构的屏蔽电动机不仅可以显著提高屏蔽电动机的效率,而且降低了屏蔽套过热而产生的起皱和破损的几率,可以提高屏蔽泵电动机的运行安全性。

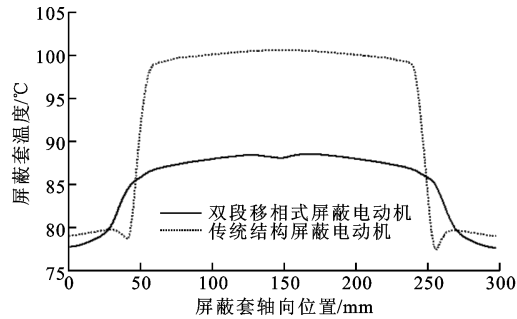


图 7 额定负载时定子屏蔽套温升分布

5 结 论

本文提出一种新型双段移相式屏蔽电动机结构,通过三维涡流场有限元仿真,得到屏蔽套涡流损

耗以及相对应的温升分布。通过涡流场分析表明,新型结构屏蔽电动机中屏蔽套上的涡流密度明显下降,体现了双段移相式屏蔽电动机屏蔽套上感应电势的抵消作用。就算例而言,定子屏蔽套涡流损耗降低了近32%,由于涡流损耗的降低,定子屏蔽套的温升得到抑制,算例屏蔽电动机屏蔽套温升下降了13℃,其热应力及热膨胀也会随着温度的降低而减小。

虽然相对于传统屏蔽电动机,新型屏蔽电动机轴向长度会略有增加,导致成本增加,但是可以控制在可接受的范围内。电机的损耗降低,温升下降,提高了电机的安全性,对核电用户而言,屏蔽泵的安全性更为重要,也更具有工程实用价值。

由于屏蔽套中感应电势随气隙磁场的旋转而变化,屏蔽套是分布式导体,屏蔽套中涡流路径不能人为规划,导致感应电势未能完全抵消,涡流损耗未能完全抑制。如何更高效地抑制屏蔽套感应电势有待进一步深入研究,例如基于抵消感应涡流电势的思想,探索新的结构,寻求新的方法。

参考文献:

- [1] 陈媛媛. 浅谈屏蔽泵的性能特点及选型 [J]. 企业技术开发, 2011, 30(16): 179-180.
CHEN Yuanyuan. Performance and selection of canned pump [J]. Technological Development of Enterprise, 2011, 30(16): 179-180.
- [2] 安跃军, 安辉, 薛丽萍, 等. 屏蔽电动机抑制屏蔽套涡流方法和装置: 中国: 201010561317.4[P]. 2013-11-16.
- [3] 蒋万明, 孔繁余, 夏斌. 对称布置型多级屏蔽泵的设计 [J]. 水泵技术, 2012(5): 1-4.
JIANG Wanming, KONG Fanyun, XIA Bin. Design of canned pump in symmetrical and multistage arrangement [J]. Pump Technology, 2012(5): 1-4.
- [4] 安跃军, 安辉, 薛丽萍, 等. 一种抑制屏蔽套涡流损耗的屏蔽电动机: 中国: 201020627480.1[P]. 2011-06-22.
- [5] 孙树林, 李觉民. 屏蔽式感应电动机屏蔽套损耗的计算及减少途径 [J]. 大电机技术, 1987(6): 30-33.
SUN Shulin, LI Juemin. Calculation of electric losses on the shield for canned inductive motor and the ways of its reduction [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 1987(6): 30-33.
- [6] 马德鑫. 浅谈屏蔽式异步电动机的设计特点 [J]. 电动机技术, 2001(1): 27-30.
MA Dexin. Design characteristics of induction canned

motor [J]. Electrical Machinery Technology, 2001(1): 27-30.

- [7] 蒋大青, 付志红, 侯兴哲, 等. 基于 Maxwell 3D 瞬变电磁法三维正演研究 [J]. 电测与仪表, 2012, 49(6): 29-32.
JIANG Daqing, FU Zhihong, HOU Xingzhe, et al. Research about 3D forward modeling of transient electromagnetic method based on Maxwell 3D [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(6): 29-32.
- [8] 安跃军, 周利民. 李文瑞, 等. 低压大电流车载发电机改善换向研究 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(8): 111-116.
AN Yuejun, ZHOU Limin, LI Wenrui, et al. Improved commutation for low-voltage high-current vehicle generators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(8): 111-116.
- [9] 赵博, 张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 61-62.
- [10] 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.

[本刊相关文献链接]

- 丁树业, 刘书齐, 毕刘新, 等. 矢量控制下永磁同步电机的损耗分析 [J]. 2013, 47(12): 95-101. [doi:10.7652/xjtuxb201312017]
- 杨军, 施虎, 梅雪松, 等. 双驱伺服进给系统热误差的试验测量与预测模型构建 [J]. 2013, 47(11): 53-59. [doi:10.7652/xjtuxb201311010]
- 续丹, 包鑫, 霍小宁, 等. 永磁同步电机宽速域无位置传感器控制 [J]. 2013, 47(9): 60. [doi:10.7652/xjtuxb201309010]
- 罗战强, 梁得亮, 丁文. 双余度稀土永磁无刷伺服系统的控制策略 [J]. 2012, 46(12): 66-73. [doi:10.7652/xjtuxb201212012]
- 陈梁远, 李黎川. 往复式开关磁阻直线电机的效率最大化控制 [J]. 2012, 46(10): 15-19. [doi:10.7652/xjtuxb201210003]
- 刘英想, 姚郁, 陈维山, 等. 纵振复合双足直线超声电机 [J]. 2012, 46(8): 111-115. [doi:10.7652/xjtuxb201208020]
- 安跃军, 周利民, 李文瑞, 等. 低压大电流车载发电机改善换向研究 [J]. 2012, 46(8): 116-121. [doi:10.7652/xjtuxb201208021]
- 杜锦华, 梁得亮. 波能直驱互感耦合式开关磁阻发电机的最佳效率跟踪控制 [J]. 2012, 46(4): 52-57. [doi:10.7652/xjtuxb201204009]
- 何栋炜, 彭侠夫, 蒋学程, 等. 永磁同步电机的改进扩展卡尔曼滤波测速算法 [J]. 2011, 45(10): 59-64. [doi:10.7652/xjtuxb201110011]

(编辑 杜秀杰)