

化工泵用新型复合鼠笼结构屏蔽电机驱动性能及多物理场分析*

秦 鑫¹, 安跃军¹, 张志恒¹, 杨维国¹, 栾晓颖², 钱运德², 邓文字³, 齐丽君³
(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 大连金石泵业有限公司, 辽宁 大连 116000;
3. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

摘 要: 化工泵用屏蔽电机是化工泵的主要动力源, 具有运行可靠、无介质泄漏等优点, 因而对其运行性能及多物理场分布情况进行分析十分重要。设计了一种用于化工泵用屏蔽电机的新型复合鼠笼结构, 通过商业场路耦合时步有限元软件确定电机尺寸, 并对其驱动性能进行了分析。基于流固耦合思路, 对比分析了新型复合鼠笼结构以及常规纯铜鼠笼电机的三维温度场分布和应力场分布, 通过试验和解析计算, 验证了所设计的化工泵用屏蔽电机新型复合鼠笼结构及电机方案的合理性和可行性。在基本确保力能指标的前提下, 其起动转矩倍数提高了 2.6%, 起动电流倍数减小了 2.2%, 绕组端部温度降低了 3.18 °C, 电机质量和成本均有所降低。

关键词: 屏蔽电机; 多物理场分析; 驱动性能; 复合鼠笼

中图分类号: TM 358 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)05-0053-07

doi: 10.12177/emca.2020.017

Driving Performance and Multiphysics Analysis of New Composite Squirrel Cage Structure Canned Motor for Chemical Pumps*

QIN Xin¹, AN Yuejun¹, ZHANG Zhiheng¹, YANG Weiguo¹, LUAN Xiaoying²,
QIAN Yunde², DENG Wenyu³, QI Lijun³
(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. Dalian Jinshi Bengye Co., Ltd., Dalian 116000, China;
3. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Abstract: The canned motor for chemical pump is the main power source of chemical pump. It has the advantages of reliable operation and no medium leakage. It is very important to analyze its operating performance and multiphysics distribution. A new composite squirrel cage structure is designed for the canned motor for chemical pump. The size is determined by the commercial field-circuit coupling time-step finite element software, and its driving performance is analyzed. Based on the idea of fluid-solid coupling, the three-dimensional temperature field and stress field distribution of the new composite squirrel cage structure and the conventional pure copper squirrel cage motor are compared and analyzed. Through experiments and analytical calculations, the new canned motor for chemical pump designed is verified. The composite squirrel cage structure and the motor scheme are reasonable and feasible. On the premise of ensuring the energy index, the starting torque multiple is increased by 2.1%, the starting current multiple is reduced by 2.6%, and the winding end temperature is reduced by 3.18 °C. In addition, the weight and cost of the

收稿日期: 2020-02-14; 收到修改稿日期: 2020-03-31

* 基金项目: 辽宁省科技重大专项项目(2019JH1/10100016)

作者简介: 秦 鑫(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机及其控制。

安跃军(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为特种电机及其控制。

motor are reduced.

Key words: canned motor; multiphysics analysis; driving performance; composite squirrel cage

0 引言

随着工业技术不断发展,具有高可靠性、耐腐蚀、清洁无泄漏的化工泵在石油化工行业得到广泛应用^[1]。化工泵用屏蔽电机是化工泵的主要动力来源,因此其运行性能及多物理场分布情况对整个化工泵的运行性能会产生显著的影响^[2-3]。

三相感应电机具有结构简单、成本低、运行稳定等优点,通过在其气隙内加装屏蔽套就可得到化工泵用屏蔽电机。文献[4-5]研究了采用不同屏蔽套材料的屏蔽电机的稳态等效电路、损耗及性能。文献[6]对屏蔽电机的三维温度场及其影响因素进行研究,为屏蔽电机冷却计算及设计提供了参考。文献[7]对笼型实心转子屏蔽感应电机进行研究,给出了适用于多种复杂转子结构感应电机的等效电路参数分析法。但是,有关化工泵用屏蔽电机新型转子结构设计、分析等方面的研究较少。

常规的感应电机转子结构可分为绕线式和鼠笼式,其中鼠笼式转子主要由转子导条和转子端环组成,材料一般为铜或铝,装配工艺分为液态金属铸造式和固态金属焊接式^[8]。近年来,随着行业内对电机节能要求文件的出台,铜鼠笼电机逐渐得到了广泛的应用,在同样的电机尺寸条件下,铜鼠笼电机可以达到更高的能效水平,具有低温升、高可靠性、低振动噪声等优点。

由于铜的熔点较高,采用液态铜铸造铜鼠笼时,存在着能源消耗大、铸造时容易产生导条气泡等缺点。在进行铜鼠笼加工及端部整形时,需要大量磷铜焊接及对大块的铜材施以较多的切削工艺,增加了不必要的金属耗费及附加成本。此外,文献[9]研究了铜鼠笼电机在某些工业场合存在起动能力较低的问题。

为此,本文基于电机设计原理,采用商业有限元软件,对1台常规的化工泵用屏蔽电机转子鼠笼结构进行改进,设计了一种新型复合鼠笼结构(铜导条+铝端环),有效降低了电机成本、节约能源、减轻机身质量,并改善了电机的起动性能。

1 化工泵用复合鼠笼结构屏蔽电机结构及驱动性能分析

1.1 化工泵用复合鼠笼结构屏蔽电机结构

图1所示为化工泵用屏蔽电机的二维物理模型示意图。主要由定子铁心、定子绕组、转子铁心、转子鼠笼、转轴、定子屏蔽套和转子屏蔽套构成。与传统感应电机相比,除了关键尺寸需与化工泵体相匹配之外,在定转子之间需分别加装定子屏蔽套和转子屏蔽套,从而实现电机气隙与电机定转子之间的有效隔离,保证介质无泄漏。

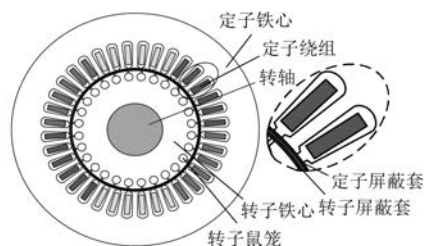


图1 化工泵用屏蔽电机的二维物理模型

图2所示为传统纯铜鼠笼和新型复合鼠笼结构示意图。传统纯铜鼠笼端环和导条均是由铜制成,而本文所设计的新型复合鼠笼结构则用铝端环替代铜端环,鼠笼整体是由铜导条和铝端环焊接而成,这种复合鼠笼结构能够有效减轻鼠笼的质量,节约成本。通过对端环尺寸的合理设计还可以实现电机各项性能的提高。其中,端环尺寸包括高度 h_r 和宽度 w_r 。

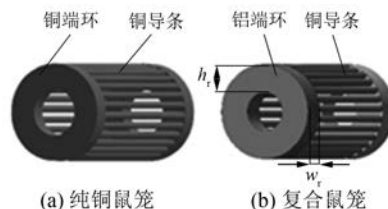


图2 传统纯铜鼠笼和新型复合鼠笼结构示意图

1.2 化工泵用复合鼠笼结构屏蔽电机驱动性能分析

1.2.1 电磁场有限元分析基础

麦克斯韦方程组是用来描述电磁场理论的一组方程,也是进行电磁场分析与研究的基础。麦

克斯韦方程组由安培环路定律、法拉第电磁感应定律、高斯定律和高斯磁通定律组成,其微分形式如下^[10]:

$$\begin{cases} \nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \boldsymbol{D} = \rho \\ \nabla \times \boldsymbol{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度矢量; $\boldsymbol{J}$ 为传导电流密度矢量; $\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量; $\boldsymbol{E}$ 为电场强度矢量; $\boldsymbol{B}$ 为磁通密度矢量; ρ 为自由电荷密度。

电磁场问题中,式(1)的 4 个方程存在以下关系:

$$\begin{cases} \boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H} \\ \boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε 为介电常数; μ 为磁导率; σ 为电导率。

1. 2. 2 电机起动性能和过载能力

以 1 台额定功率为 7.8 kW 的化工泵用屏蔽电动机为对象,基于商业场路耦合时步有限元仿真软件,分别建立了传统纯铜鼠笼和新型复合鼠笼结构电机的仿真计算模型,对其起动性能、过载能力进行研究。为了确定新型复合鼠笼结构电机的结构参数,将鼠笼端部高度、宽度作为自变量,将电机的起动转矩倍数、起动电流倍数和最大转矩倍数作为因变量,进行性能分析。表 1 所示为传统纯铜鼠笼结构电机和新型复合鼠笼结构电机的性能参数表。

表 1 纯铜鼠笼和复合鼠笼电机性能参数表		
参数名称	纯铜鼠笼	复合鼠笼
额定功率/kW	7.8	7.8
电源频率/Hz	50	50
极对数 p	1	1
气隙长度 δ /mm	0.5	0.5
额定电压/V	380	380
铁心长度/mm	140	140
定转子屏蔽套厚度/mm	0.5	0.5
鼠笼端环高度 h_r /mm	15	h_r
鼠笼端环宽度 w_r /mm	21	w_r

图 3 和图 4 所示分别为不同的 h_r 和 w_r 对新型复合鼠笼结构电机起动性能和过载能力的影响。由图 3 和图 4 可见,随着 h_r 和 w_r 的增加,电

机起动转矩倍数减小,起动电流倍数增加,最大转矩倍数增加。

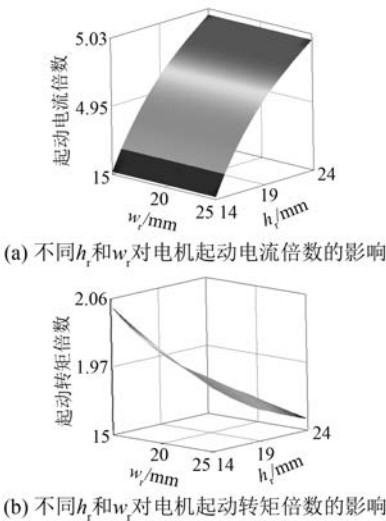


图 3 不同 h_r 和 w_r 对电机起动性能的影响

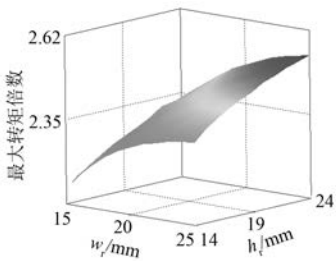


图 4 不同 h_r 和 w_r 对电机过载能力的影响

考虑到实际转子端部安装尺寸限制,以及实现电机性能提升的目标, h_r 和 w_r 的范围分别为 15~25 mm 和 14~24 mm,通过正交试验法建立一个二因素三水平的仿真表格,进行仿真分析^[11]。将所得结果与电磁场仿真结果相结合,从而找到综合性能最佳的电机方案。其中,二因素为 h_r 和 w_r ,三水平分别为起动转矩倍数、起动电流倍数和最大转矩倍数。仿真结果表明: h_r 、 w_r 分别为 21、15 mm 时,新型复合鼠笼结构电机转子电阻和漏抗值均大于传统纯铜鼠笼电机,前者定子电流大于后者。转子电流则与之相反,前者总损耗略高,从而使得电机的效率有所降低。2 种鼠笼结构电机的功率因数基本相同。较大的转子电阻使复合鼠笼结构电机具有更好的驱动性能,即拥有较低的起动电流倍数和较高的起动转矩倍数。而单纯增加转子电阻,基本不会影响电机的过载能力,即最

大转矩倍数基本不变^[11]。在提高电机驱动性能的同时,将在一定程度上降低运行性能。传统纯铜鼠笼与复合鼠笼结构电机参数如表2所示。由表2可以看出,除电机效率外,新型复合鼠笼结构电机各项性能指标均优于传统纯铜鼠笼电机。

表2 传统纯铜鼠笼与复合鼠笼结构电机参数

参数名称	纯铜鼠笼	复合鼠笼
效率 $\eta/\%$	78.36	78.29
功率因数 $\cos \varphi$	0.850	0.852
起动电流倍数 I_{st}	4.96	4.85
起动转矩倍数	1.91	1.96
最大转矩倍数	2.57	2.57
额定转矩 $T_N/(N \cdot m)$	27.08	27.10

当 h_r 、 w_r 分别为 21、15 mm 时,采用新型复合鼠笼结构的电机鼠笼端环用铝量为 0.314 kg,导条处用铜量为 0.985 kg。而传统纯铜鼠笼结构电机鼠笼端环用铜量为 1.096 kg,导条处用铜量与新型复合鼠笼结构相同,即新型复合鼠笼结构比传统纯铜鼠笼结构减重了 37.58%。依据铜和铝的市场价格^[12],新型复合鼠笼比传统纯铜鼠笼的金属成本降低了约 48.35%。从而可知,采用新型复合鼠笼结构的电机不仅减轻了机身质量,同时降低了成本。

图5所示为纯铜鼠笼电机以及复合鼠笼结构电机转速-转矩曲线。其中,传统纯铜鼠笼电机和新型复合鼠笼电机的起动转矩倍数分别为 1.91 和 1.96,二者的最大的转矩倍数均为 2.57,由此可知,新型复合鼠笼结构电机的驱动性能整体比传统纯铜鼠笼电机有所提升。

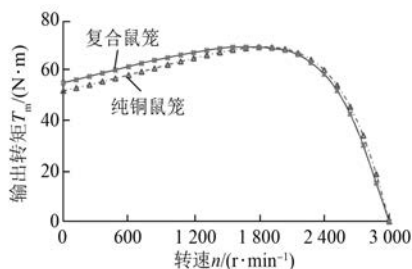


图5 2种电机的转速-转矩曲线

2 三维温度场仿真分析

2.1 温度场有限元基础

稳态温度场中,考虑边界条件时,可将求解导热微分方程看作是边值问题^[13]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_v \\ T|_{S_1} = T_0 \\ -k_2 \frac{\partial T}{\partial N} |_{S_2} = q \\ -k_3 \frac{\partial T}{\partial N} |_{S_3} = \alpha(T - T_f) \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_x 、 k_y 、 k_z 为 x 、 y 、 z 方向的导热系数; T 为物体温度; q_v 为热源的发热密度; S_1 为第一类边界条件的物体边界; T_0 为已知边界面的温度; k_2 为第二类边界条件垂直于界面 S_2 的热传导率; q 为通过界面 S_2 的热流密度; k_3 为第三类边界条件垂直于界面 S_3 的热传导率; α 为在界面 S_3 与物体接触的冷却介质的换热系数; T_f 为在界面 S_3 与物体接触的冷却介质的温度。

2.2 温度场仿真结果分析

利用 Workbench 进行三维温度场分析,生成三维物理模型,并添加屏蔽套、定子槽绝缘等结构,在 SolidWorks 中绘制机壳,装配出完整的电机模型。本文的化工泵用屏蔽电机气隙内流过的介质温度约为 $(35 \pm 5)^\circ\text{C}$,且流速较快,具有较好的冷却能力。除生热率的添加外,还需在定、转子屏蔽套上添加相应温度负载。仿真结果如图6、图7所示。

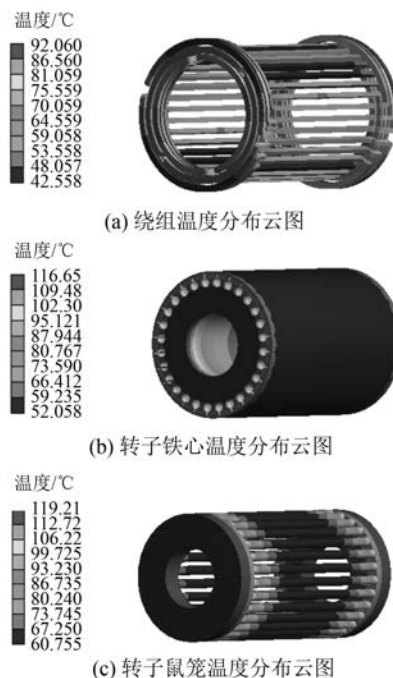


图6 传统纯铜鼠笼电机关键结构温度分布云图

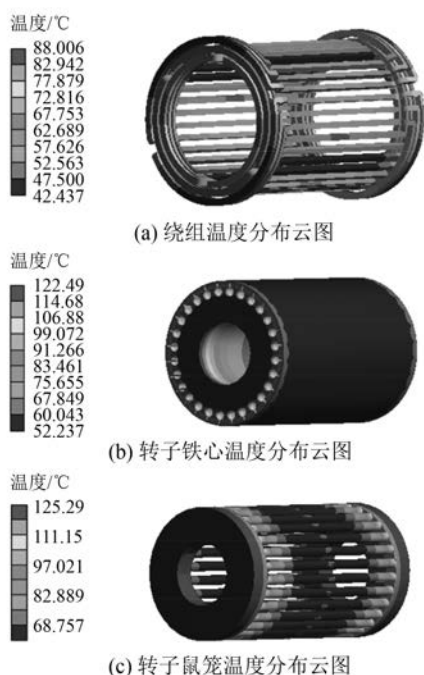


图7 复合鼠笼电机关键结构温度分布云图

由仿真结果可以看出,2个电机模型的温度分布趋势基本相同,各部分均是端部温度较高,中部温度较低。传统纯铜鼠笼电机绕组端部温度为92.06℃,转子铁心端部温度为116.65℃,鼠笼端环处温度为119.21℃。采用新型复合鼠笼结构的电机相同位置的温度分别为88.87、122.49和125.29℃。2台电机的绕组温升均满足H级绝缘要求,而由于化工泵用屏蔽电机结构特点,其转子部分散热困难,温升高于其他部分,但本文2种电机转子部分的温升仍在合理范围内。从而可知,采用新型复合鼠笼结构不仅可以保证化工泵用屏蔽电机的性能、满足绝缘要求,还能有效降低电机质量并节约成本,实现了预期目标。

3 三维热应力场仿真分析

3.1 应力场有限元基础

物体温度变化会产生热形变,且形变量与温度变化量成正比。若温度变化较大,产生较大的热应力,在电机的薄弱部位可能发生结构问题^[14]。

根据热应力理论,通过将弹性力学中的胡克定律推广到热应力问题上,得到物体热应力的数学表达式^[15]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \beta t \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \beta t \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \beta t \end{cases} \quad (4)$$

式中: ε_x 、 ε_y 、 ε_z 为 x 、 y 、 z 方向上的应变; E 为物体的弹性模量; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为 x 、 y 、 z 方向上的正应力; μ 为泊松比; β 为线性膨胀系数。

3.2 热应力场仿真结果分析

将温度场仿真结果作为热应力场的载荷进行热应力场的仿真^[16-17]。由于2台电机的差别在于转子鼠笼端环材料与尺寸的变化,且屏蔽电机气隙中通过一定温度的介质,屏蔽套的温度和应力分布通常在合理的范围之内,因此本文重点是研究转子部分的热应力场分布。图8、图9所示分别为采用2种方案的转子铁心和转子鼠笼的热形变图和热应力图。

由图8、图9可知,由于转子铁心端部温度较高,因而受到较大的热应力,传统纯铜鼠笼电

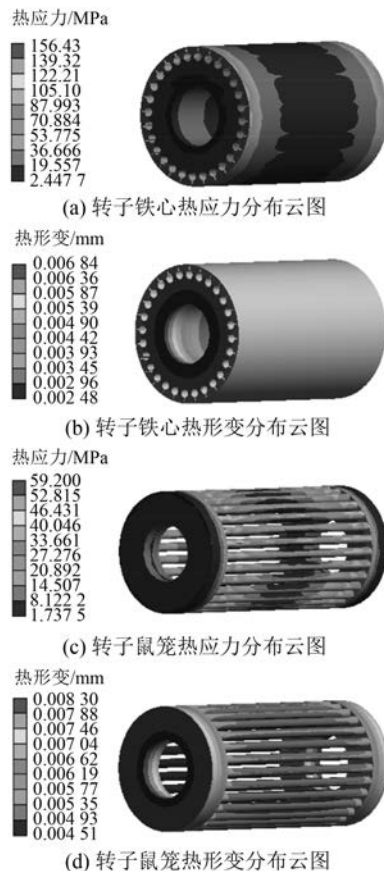


图8 纯铜鼠笼电机转子热应力与热形变分布云图

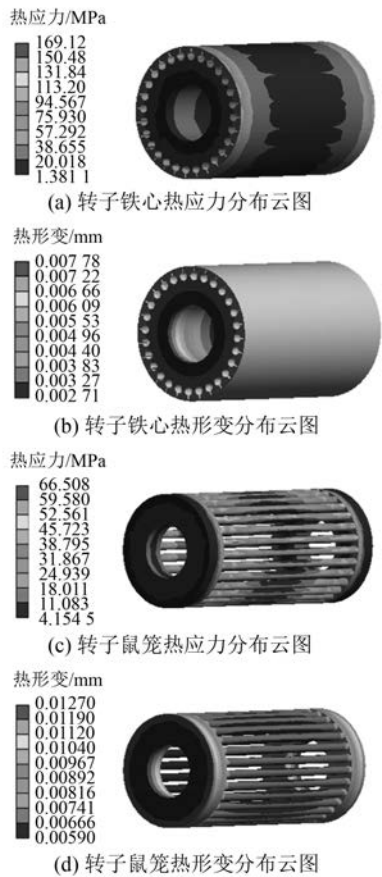


图9 复合鼠笼电机转子热应力与热形变分布云图

机的热应力最大值为 156.43 MPa,而复合鼠笼结构电机的热应力最大值为 169.12 MPa;传统纯铜鼠笼电机的最大热形变最大值为 0.006 84 mm,复合鼠笼结构电机最大值为 0.007 78 mm。因为转子鼠笼端环与导条交界处应力较为集中,所以热应力值和热形变量会略高于其他部分,进一步研究发现,传统纯铜鼠笼电机的热应力为59.200 MPa,复合鼠笼结构端环则为 66.508 MPa,2 台电机端环处的最大热形变分别为 0.008 30 mm 和 0.012 70 mm。在热应力方面,传统纯铜鼠笼电机略低于复合鼠笼结构,同时复合鼠笼结构的端部热形变量会略大于传统纯铜鼠笼。进一步分析可知,2 种方案的热应力和热形变量均在允许的范围,不会发生明显的结构损害。

4 试验与解析验证

为了验证本文所提新型复合鼠笼结构电机的有效性,搭建试验平台进行试验。图 10 所示为样

机试验平台,包括测功机、功率分析仪、变频器、测功机控制器、转速转矩测量仪等试验设备。

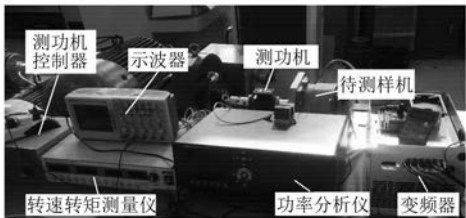


图 10 样机试验平台及相关设备

表 3 所示为待测样机的试验值与仿真值对比情况。由表 3 可知,误差均在合理的范围内,满足工程实际需求,进而验证了所提计算方法与结果的正确性。

表 3 仿真值和试验值对比

参数名称	仿真值	试验值	误差/%
P_1/kW	10.04	10.15	1.10
P_2/kW	7.87	7.70	2.03
$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	2 810	2 830	0.71
I_N/A	17.95	18.6	3.62
$\eta/\%$	78.36	75.95	3.08
$\cos \varphi$	0.85	0.83	1.20

由于化工泵用屏蔽电机一般采用滑动轴承,现有试验平台进行堵转测试会导致轴承干磨损坏,为此可将文中有限元方法得到的仿真结果与数值解析法的等效电路法计算结果相结合,对起动能力的各项数值做进一步的试验验证。通过仿真计算,新型复合鼠笼结构电机定子电阻为 0.54 Ω ,定子漏抗为 0.82 Ω ,转子电阻规算值为 0.47 Ω ,转子漏抗规算值为 1.05 Ω ,励磁电抗为 28.76 Ω ,根据文献[18]中归纳的电机等效电路,电磁转矩 T_e 为

$$T_e = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + c \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2} \quad (5)$$

式中: m_1 为定子相数; Ω_s 为同步角速度; U_1 为电源电压; R'_2 为转子绕组电阻规算值; s 为转差率; R_1 为定子绕组电阻; c 为修正系数; $X_{1\sigma}$ 为定子漏抗; $X'_{2\sigma}$ 为转子漏抗规算值。

修正系数 $c = 1 + \frac{Z_{1\sigma}}{Z_m} \approx 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_m} = 1.026$,起动转矩

T_{sl} 是转速为零时的 T_e , 将 $s=1$ 代入式(5), 可得起动转矩, 并结合表 2 中额定转矩, 最终得到起动转矩倍数为 1.88。 $T-n$ 曲线中存在最大转矩值 T_{max} , 可近似为

$$T_{max} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2}{2c[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + cX'_{2\sigma})^2}]^2} \quad (6)$$

代入数值可得最大转矩, 最终求得最大转矩倍数为 2.48。电磁场分析计算结果与等效电路磁路分析计算结果以及 2 种结构的差异如表 4 所示。最大转矩和起动转矩的差异分别为 3.90% 和 4.10%, 可知场算结果与路算结果基本一致。

表 4 场算结果与路算结果差异对比

参数名称	场算值	路算值	差异/%
起动转矩倍数	1.96	1.88	4.10
最大转矩倍数	2.57	2.47	3.90

5 结 语

本文通过多物理场仿真的方法, 对化工泵用屏蔽电机进行改进设计, 用新型复合鼠笼结构替代传统纯铜鼠笼, 对化工泵用的传统纯铜鼠笼屏蔽电机及新型复合鼠笼结构屏蔽电机进行了电磁场、温度场以及热应力场的仿真计算, 对不同分析计算方法获得的结果进行了对比。利用试验平台, 对分析计算结果进行了验证。得出主要结论如下:

(1) 本文采用的仿真模型精确度较高, 2 种鼠笼结构电机的各项误差均在 5% 以内, 满足工程实践要求, 可认为仿真结果具有工程应用价值。

(2) 用新型复合鼠笼结构替代传统纯铜鼠笼可以在保证电机力能指标与过载能力的同时有效提高电机起动性能。其中, 起动转矩倍数提高了 2.1%, 起动电流倍数降低了 2.2%。

(3) 新型复合鼠笼结构电机和传统纯铜鼠笼电机的温度场和应力场的分布趋势相同。其中, 前者比后者的绕组端部温度降低了 3.18 °C, 而转子部分平均温度升高了 6.12 °C, 相应转子部分最大热形变也有所增加, 均在允许范围内。

(4) 采用新型复合鼠笼结构替代传统纯铜鼠笼结构有效减少了用铜量, 在减轻机身质量的同时节约了成本。

【参 考 文 献】

- [1] 安跃军, 张志恒, 张振厚, 等. 真空干泵用屏蔽电机无速度传感器带速重投控制系统[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2665.
- [2] 孔祥花. 屏蔽泵能耗的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
- [3] 倪正方. 美国化工用无密封泵(磁力泵和屏蔽泵)标准解读[J]. 水泵技术, 2008(3): 25.
- [4] AGARWAL P D. Equivalent circuits and performance calculations of canned motors[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III: Power Apparatus and Systems, 1960, 79(3): 635.
- [5] GAO L, WEI J, LI C, et al. Analyses on performances of megawatt double canned induction motors with different can materials[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 667.
- [6] 李藏雪, 任智达, 路义萍, 等. 一种屏蔽电动机的三维温度场及影响因素研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(8): 15.
- [7] 凌在汛, 周理兵, 张毅, 等. 笼型实心转子屏蔽感应电机电磁场及参数研究(四): 等效电路参数有限元算法及验证[J]. 电工技术学报, 2018, 33(21): 4987.
- [8] 杨亚琴. 鼠笼转子压力铸造工艺参数的优化[J]. 现代机械, 2012(1): 26.
- [9] 伊然, 范晓彬, 李龙, 等. 铸铜转子对三相异步电机性能的影响研究[J]. 电工电气, 2017(8): 14.
- [10] 陈华毅, 杨明发. 异步电机三维电磁场及温度场耦合仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(1): 42.
- [11] 金永星, 王爱元, 王涛, 等. 基于粒子群算法的核屏蔽感应电机多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 53.
- [12] 高宜朋, 庞金锋, 夏贵斌. 金属材料价格波动对舰船及配套设备价格影响[J]. 价值工程, 2018, 37(14): 62.
- [13] 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.
- [14] 谢颖, 辜承林. 笼型感应电动机三维全域温度场计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 96.
- [15] 王小飞, 代颖, 罗建, 等. 电动汽车牵引用水冷异步电机耦合场分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(4): 110.

(下转第 69 页)