

油摩损耗对电潜泵用永磁电机流固耦合传热计算的影响^{*}

董 婷, 陆万峰

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 电潜泵用永磁电机工作在高温高压的特殊环境下, 采用润滑油作为潜油电机的润滑和冷却物质, 润滑油随着转子在气隙中运动。以往研究只考虑了转子油摩损耗, 然而相比于空冷、水冷等冷却方式, 油冷时, 润滑油黏度较大的特性是不可忽略的因素。且电潜泵用电机转速较高, 润滑油对定子侧产生的油摩损耗是否可以忽略及其对电机温升的影响需进一步探究。因此, 以一台 15 kW 潜油永磁电机为例, 推导出了定子油摩损耗近似解析式, 提出了定子油摩损耗与转子油摩损耗的关系规律。基于计算流体力学和流固耦合传热理论, 研究了气隙处流体流动特性, 证明了定子油摩损耗近似解析式的准确性, 得出了电机各部件温升分布, 并分析了定子油摩损耗对电机的温升影响。

关键词: 潜油电机; 油摩损耗; 流固耦合; 三维流体场; 温度场

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)02-0001-06

doi: 10.12177/emca.2022.140

Influence of Oil Friction Loss on Calculation of Fluid-Structure Coupling Heat Transfer of Permanent Magnet Motor for Electric Submersible Pump^{*}

DONG Ting, LU Wanfeng

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The permanent magnet motor for electric submersible pump works in a special environment of high temperature and high pressure. The lubricating oil is used as the lubricating and cooling material of the submersible motor and lubricating oil moves with the rotor in the air gap. In previous studies, only the oil friction loss of the rotor is considered. However, compared with cooling methods such as air cooling and water cooling, the higher viscosity of the lubricating oil is a factor that cannot be ignored when oil cooling. And the motor speed of the electric submersible pump is high. Whether the oil friction loss caused by lubricating oil on the stator side can be ignored and its influence on the temperature rise of the motor need to be further explored. Therefore, taking a 15 kW submersible permanent magnet motor as an example, the approximate analytical formula of the stator oil friction loss is derived, and the relationship between the stator oil friction loss and the rotor oil friction loss is proposed. Based on computational fluid dynamics and fluid-structure coupling heat transfer theory, the fluid flow characteristics at the air gap are studied. The accuracy of the approximate analytical formula for stator oil friction loss is proved. The temperature rise distribution of each part of the motor is obtained, and the influence of the stator oil friction loss on the temperature rise of the motor is analyzed.

Key words: submersible motor; oil friction loss; fluid-structure coupling; three-dimensional fluid field; temperature field

收稿日期: 2022-10-11; 收到修改稿日期: 2022-10-24

^{*} 基金项目: 辽宁省教育厅基础项目(LJGD2020013)

作者简介: 董 婷(1982—), 女, 博士, 教授, 研究方向为交流伺服电机及其控制系统。

陆万峰(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高品质永磁及特种电机系统。

0 引言

电潜泵用永磁电机长期工作在高温高压的井下,工作环境十分复杂,无法监测电机各部件的温度。而电机长时间处于高温条件下,其安全与性能受到了严重影响^[1]。根据目前对潜油电机的研究,电机温度过高极易引发损坏和烧泵事故。常出现的一些潜油电机的故障,如线圈烧毁、电机击穿等,大多是由温度过高而导致的绝缘能力下降、线圈老化而引发的^[2]。因此分析电机的温升具有重要意义,而电机各部分损耗的准确计算也是分析温升的关键所在。

潜油电机采用润滑油作为电机的润滑和冷却物质,对于上千转的电潜泵用永磁电机而言,润滑油流动引起的机械损耗占比较大。文献[3]揭示了转子摩擦损耗随转速的变化规律。文献[4]详细地推导出了潜油电机转子油摩损耗的解析式,并验证了其准确性。文献[5]采用流体场数值计算方法,重点分析齿槽转子油摩损耗的影响因素,得到了油摩损耗与电机转速和定子内径的数值关系,揭示了温度对转子油摩损耗的影响规律。文献[6]建立了潜油永磁电机室内流热耦合温升模型,进行3D有限元温升计算,得到了室内模型各部件的温度分布情况。文献[7]采用流热耦合的方法对整个电机的温度场求解,但方法较为复杂。文献[8-10]对不同情况下的潜油电机进行了温度场仿真分析。

潜油电机温度场分析离不开损耗的准确计算,目前,流体力学中关于定、转子气隙中流体的流动问题尚无完备的理论体系,电机油摩损耗的计算仍是一项比较复杂且具有挑战性的工作。以往对潜油电机的研究只考虑了转子油摩损耗,定子油摩损耗忽略不计。然而对于高速运转的电潜泵用永磁电机,高转速、润滑油黏度大以及轴向长度较长成为了考虑定子油摩损耗的主要因素。因此,本文首次对定子油摩损耗进行研究,推导出了其的近似解析式,在流体场中进行求解分析,认为定子油摩损耗不可忽略,并用流固耦合的传热方法分析考虑定子油摩损耗时的温度场。结果表明,电机温升上升了2.5%,电机的温升更加精确,本文研究对以后电潜泵用潜油电机的温升分析具

有一定的意义。

1 流固耦合传热模型的建立

1.1 数学模型

对潜油电机内的流体流动和传热效应进行分析,应遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律等物理守恒定律^[11]。

在计算时,认为潜油电机内的流体为不可压缩黏性流体,其质量守恒方程为

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} + \frac{\partial w_1}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u_1 、 v_1 、 w_1 为 x 、 y 、 z 方向上速度矢量 v_0 的分量。

动量守恒方程也称作 Navier-Stokes 方程,其矢量形式为

$$\rho \frac{\partial (\rho \mu)}{\partial t} = -\nabla p + \mu \Delta v + \rho F \quad (2)$$

式中: p 为流体微元体上的压力; ρ 为密度; μ 为动力黏度系数; t 为时间; v 为运动黏度系数; F 为微元体上的体力。

潜油电机内以温度 T 为变量的牛顿流体的能量守恒方程为

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho v_0 T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c} \text{grad} T\right) + S_r \quad (3)$$

式中: λ 为流体导热系数; c 为比热容; S_r 为黏性耗散项。

另外,应用流固耦合传热方法需结合导热微分方程和三类边界条件,表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = -q_v \\ T|_{s_1} = T_0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = q_0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_3} = \alpha(T - T_f) \end{cases} \quad (4)$$

式中: λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的流体导热系数; q_v 为热源产生的损耗密度; T_0 为定温边界 s_1 上的温度; q_0 为边界 s_2 上的热流密度; T_f 为对流换热面 s_3 外界流体的温度; α 为对流换热系数。

1.2 物理模型

潜油电机一般工作在空间狭小细长的油井

中,因此电机长径比很大,为了方便安装和定子绕组下线,防止电机发生扫膛的现象,整个电机由多个单元电机组成。两个单元电机定子之间由隔磁段连接,转子部分由扶正轴承相连,电机采用密闭式结构,转轴内部为空心。电机运行时,润滑油在转轴内腔、扶正轴承甩油孔和定、转子气隙中流动,形成循环油路,从而使润滑油起到润滑与散热作用,潜油电机结构如图 1 所示。

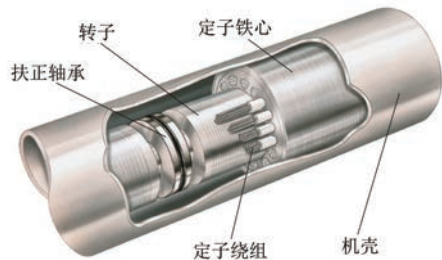


图 1 潜油电机结构图

本文以一台 15 kW 的电潜泵用永磁电机为例,分析一段单元电机,其单段潜油电机的三维示意图如图 2 所示,潜油电机的基本参数如表 1 所示。

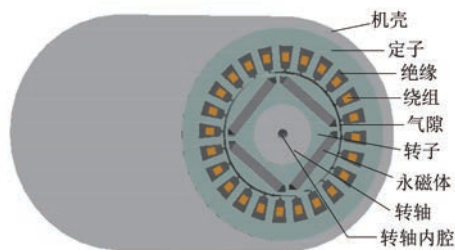


图 2 单段潜油电机三维示意图

表 1 15 kW 电潜泵用永磁电机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	15	定子外径/mm	105
额定电压/V	150	定子内径/mm	62
额定转速/(r·min ⁻¹)	6 000	气隙长度/mm	1
极对数	2	转子外径/mm	30
槽数	24	铁心长度/mm	300

2 油摩损耗及流体特性分析

电潜泵用永磁电机在井下工作时,环境温度可以达到 100℃ 以上,电机内部组件如绕组、永磁体等会在高温下损坏、退磁,因此准确计算电机的

内部损耗对判断电机的温升具有重要意义。本文在推导油摩损耗的近似解析式时,假设定子内表面和转子外表面光滑,油摩损耗可以等效为两个光滑圆柱之间的润滑油随内圆柱旋转的黏滞损耗问题。

2.1 转子与润滑油间的油摩损耗

以往的研究中已经有研究人员推导出了转子油摩损耗,文献[12]在讨论润滑油在细长的潜油电机定、转子之间运动时,采用柱坐标系(r, θ, z),设转子的旋转角速度为 ω_0 ,转子的外圆半径为 R_2 ,定子的内圆半径为 R_1 ,则其中随转子高速旋转的润滑油运动速度为

$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r} \tag{5}$$

式中: $C_1 = -\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \omega_0$; $C_2 = -\frac{R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \omega_0$ 。

最终推导出转子油摩损耗,这里不过多赘述,直接给出其公式:

$$P_{\text{转}} \approx \frac{2\pi\mu R_2^3 \omega_0^2}{g} L \tag{6}$$

式中: $P_{\text{转}}$ 为转子油摩损耗; g 为电机气隙; L 为气隙区域的轴向长度。

考虑到定子油摩损耗也不可忽略,本文将在此研究基础上,继续对定子油摩损耗近似解析式进行推导。

2.2 基于牛顿内摩擦定律的定子油摩损耗

牛顿内摩擦定律表明:流体内摩擦应力和单位距离上的两层流体间的相对速度成比例。观察近壁面处的流体流动可以发现,紧靠壁面的流体黏附在壁面上,静止不动,而在流体内部之间的黏性导致的内摩擦力的作用下,靠近这些静止流体的另一层流体受迟滞作用,速度降低,因此可以说壁面和流体的摩擦可以在牛顿内摩擦定律下转换为流体内部间的摩擦。

假定润滑油服从牛顿内摩擦定律,其润滑油内切应力 τ 由牛顿内摩擦定律表示为

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} \tag{7}$$

式中: n 为电机径向距离。

而在柱坐标中,润滑油的运动速度只有圆周分量,即:

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) \quad (8)$$

将式(5)代入式(8),得到:

$$\tau = -2\mu \frac{R_1^2 R_2^2 \omega_0}{(R_1^2 - R_2^2) r^2} \quad (9)$$

由于 $R_1 - R_2 = g < R_1$, 因此可以得到 $R_1^2 - R_2^2 \approx 2gR_1$, $R_1^2 R_2^2 \approx R_2^4$ 。

将 $r = R_1$ 代入式(9),可以得到定子与润滑油间的切应力为

$$\tau_{\text{定}} = -2\mu \frac{R_1^2 R_2^2 \omega_0}{(R_1^2 - R_2^2) R_1^2} = -\frac{\mu R_2^2 \omega_0}{g R_1} \quad (10)$$

式(10)中负号说明定子面的切应力与润滑油的运动方向相反。由式(7)和式(10)可推导出:

$$du = \frac{\tau_{\text{定}} dr}{\mu} = \frac{\tau_{\text{定}} g}{\mu} = -\frac{R_2^2 \omega_0}{R_1} \quad (11)$$

根据牛顿内摩擦定律,设定子侧润滑油的运动速度为 $V_{\text{定}}$,则:

$$V_{\text{定}} = u + du = \omega_0 R_2 - \frac{R_2^2 \omega_0}{R_1} = \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right) \omega_0 R_2 \quad (12)$$

根据损耗计算的传统公式以及牛顿内摩擦定律,最终可得到定子油摩擦损耗的近似解析式为

$$P_{\text{定}} = \tau_{\text{定}} V_{\text{定}} A_{\text{定}} = \frac{\mu R_2^2 \omega_0}{g R_1} \cdot \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right) \omega_0 R_2 \cdot 2\pi R_1 L = \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{2\pi \mu R_2^3 \omega_0^2}{g} L \quad (13)$$

式中: $A_{\text{定}}$ 为定子内表面积。

由推导出的转子油摩擦损耗与定子油摩擦损耗可得到关系式:

$$P_{\text{定}} = \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right) P_{\text{转}} \quad (14)$$

以本电机为例, $P_{\text{定}} \approx 3.23\% P_{\text{转}}$, 电机总油摩擦损耗为

$$P_{\text{总}} = P_{\text{定}} + P_{\text{转}} = \left(2 - \frac{R_2}{R_1} \right) P_{\text{转}} = \left(2 - \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{2\pi \mu R_2^3 \omega_0^2}{g} L \quad (15)$$

2.3 电机内流场特性结果与分析

电机某些复杂零件对流体计算几乎无影响,

但加大了形成高质量网格的难度,故可对电机模型做适当简化,并作出如下假设以研究气隙内润滑油在转子旋转带动下的流动状态:

(1) 只分析润滑油在气隙中的流动状态,忽略定子槽口影响,可将定、转子视为两光滑圆柱;

(2) 忽略润滑油的轴向流动速度,电机选用压力入口、压力出口设置,环境温度为 100°C , 润滑油的动力黏度取 $0.015 \text{ Pa}\cdot\text{s}$;

(3) 由于气隙中流体的雷诺数很大,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型对气隙内润滑油求解。

气隙内润滑油的流速云图如图3所示,为了更清晰地观察,将流速局部放大,如图4所示。在图中可以看到润滑油从转子侧到定子侧的流速逐渐降低,符合流体在气隙内的实际状态,在转子侧的流速最大,为 18.4 m/s , 本文推导出的电机转子与润滑油接触面上的线速度为 18.84 m/s , 相差 2.4% , 仿真结果基本符合。在定子侧流速最小,为 0.71 m/s , 由式(12)可知 $V_{\text{定}}$ 为 0.6 m/s , 与仿真结果相差 0.11 m/s , 误差在可控范围内。

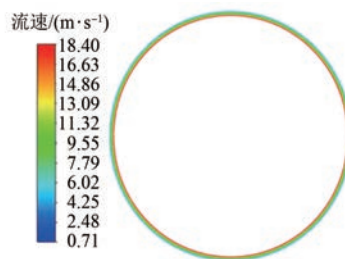


图3 气隙内润滑油的流速云图

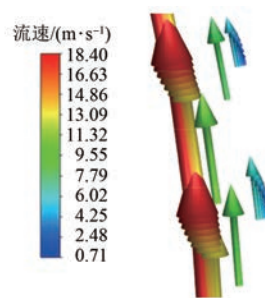


图4 气隙内润滑油流速局部放大图

在流体后处理中可以得到转子侧的切应力为 322 Pa , 定子侧的切应力为 301 Pa , 从定、转子油摩擦损耗近似解释式的推导中可以得到 $\tau_{\text{转}}$ 为 292 Pa , $\tau_{\text{定}}$ 为 273.5 Pa , 二者与仿真结果相差 30 Pa 左右。由式(13)可知,影响油摩擦损耗的因

素共有 3 个,其中 $A_{\text{定}}$ 是定子的内表面积,固定不变,当用仿真和解析式两种方法求出的速度和切应力值相近时,所求出的定子油摩损耗值也是相近的,因此可以通过仿真验证的手段证明定子油摩损耗近似解析式的准确性。

根据 $P_{\text{定}} = \tau_{\text{定}} V_{\text{定}} A_{\text{定}}$ 公式,在流体场仿真中求解得到切应力以及相应转速即可求得油摩损耗,如表 2 所示,转子油摩损耗、定子油摩损耗与仿真结果分别相差 33 W、3.8 W。

表 2 定、转子油摩损耗

方式	转子油摩损耗/W	定子油摩损耗/W
近似解析式	301	10.0
流体场仿真	334	13.8

本研究为了进一步验证黏度对流体流速和切应力的影响,将润滑油换成空气,其他因素不变。仿真后得到的空气流速分布及大小与润滑油基本一致,而切应力值非常小,转子侧切应力为 1.61 Pa,定子侧切应力为 1.49 Pa。试验说明黏度只影响了流体对定、转子面的切应力,黏度越大,切应力越大,而对气隙中流体流速的影响微乎其微。

3 电机温度场计算结果与分析

电潜泵用永磁电机在运行中会产生铁心损耗、铜耗以及各种机械摩擦损耗,导致电机内部发热严重,为了更好地探究潜油电机内部发热以及考虑定子油摩损耗对温升的影响,采用简化模型,机械损耗只考虑油摩损耗,用流固耦合传热计算进行温度场分析。仿真时作出如下假设:

(1) 油摩损耗选取流体场中计算的结果,转子油摩损耗加载到转子外表面,定子油摩损耗加载到定子内表面;

(2) 原油井周围温度为 100 ℃,计算电机稳定时的三维温度场;

(3) 整个潜油电机稳定时,电机各部件轴向方向温度不再呈阶梯状显示,而是趋于一致,为了更好地分析润滑油随转子在气隙中周向流动所导致的定子油摩损耗对温升的影响,本文将忽略润滑油的轴向流速。

在 100 ℃ 的环境温度,电机额定工况下,计算得到其余损耗并换算成生热率,如表 3 所示,并赋

给电机相应的部位充当热源。为更清晰地分析定子油摩损耗对温升带来的影响,将是否考虑定子油摩损耗的温度场进行对比,比较温升的变化。

表 3 电机各热源损耗及生热率

热源	损耗/W	生热率/(W·m ⁻³)
绕组	177	15.108×10 ⁵
定子铁心	175.9	1.478×10 ⁵
永磁体	0.23	0.012×10 ⁵
转子铁心	1.23	0.029×10 ⁵

3.1 忽略定子油摩损耗时的温度场

电机稳定运行时,润滑油在密闭电机内循环流动,润滑油的整体温度已经趋于平稳不变,从图 5 电机的整体温度场分布中也可以看出,电机轴向方向温度保持一致。电机外部是原油,电机的环境温度为 100 ℃,最高温度为 147.45 ℃,最低温度为 110.96 ℃,温升最高为 47.45 ℃,温升不超过 50 ℃,满足潜油电机的温升要求。

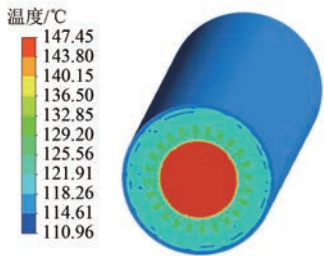


图 5 电机整体温度场分布图

不同于低速大转矩潜油电机,电潜泵用永磁电机速度较高,转子油摩损耗很大,因此最高温度不在绕组处,而在转子上。其中绕组温度分布如图 6(a) 所示,绝缘温度如图 6(b) 所示。绕组最高温度为 128.84 ℃,温升为 28.84 ℃,满足 F 级绝缘要求。绝缘最高温度为 128.79 ℃,本文选用耐高温的聚酰亚胺作为电机的绝缘材料,其耐高温达 400 ℃ 以上,满足绝缘要求。

转子以及永磁体温度场如图 7 所示,转子最高温度达到了 147.45 ℃,是电机温度最高的部位,可以看出本研究中转子油摩损耗对温度场的影响较大,是电机温度场分析中的最大热源,也导致电机永磁体的温升很高,最高温升为 47.34 ℃。为使永磁体在高温下不发生退磁,本文选用的是耐高温的钕钴(SmCo)永磁体,其居里温度高,一

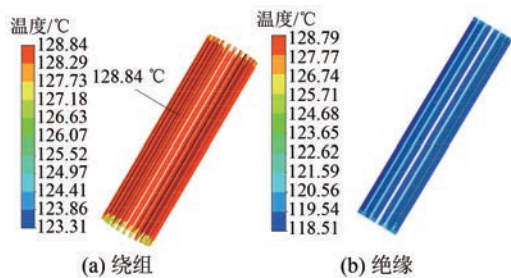


图6 电机绕组、绝缘温度分布图

一般为 700~800 °C,在高温环境下具有很强的抗退磁能力,最高工作温度可达 350 °C。

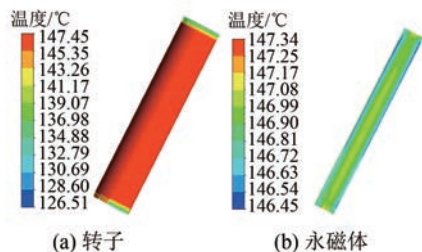


图7 电机转子、永磁体温度分布图

3.2 考虑定子油摩擦损耗时的温度场

将定子油摩擦损耗加载到定子内表面,作为一个热源,得到电机整体温度分布如图 8 所示。从图中可以看到,相比于图 5,此时的温度场最高温度增加了 1.18 °C,电机各部件的最高温度均增加了 1 °C 左右,电机最高温升增高 2.5%。

绕组温度分布如图 9 所示,相比于图 6(a),绕组最高温度增加了 1.16 °C,绕组最高温升增加了 4.0%。因此,考虑定子油摩擦损耗使温度场结果更加精准,对温升的分析具有十分重要的意义。

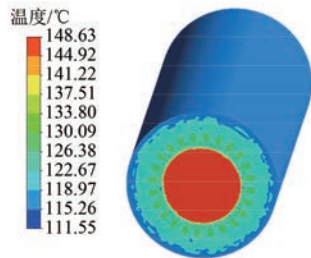


图8 考虑定子油摩擦损耗时电机整体温度分布图

4 结 语

本文以一台 6 000 r/min、15 kW 的电潜泵用永磁电机为例,推导了定子油摩擦损耗近似解析式,并对电机进行了流体场和温度场分析,得出以下结论。

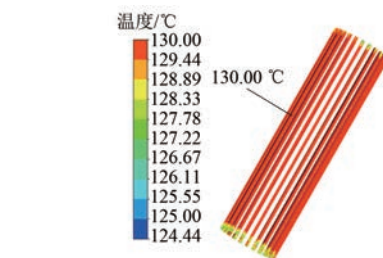


图9 考虑定子油摩擦损耗时电机绕组温度分布图

(1) 基于牛顿内摩擦定律推导出了定子油摩擦损耗近似解析式,得到了转子油摩擦损耗是定子油摩擦损耗 $1 - \frac{R_2}{R_1}$ 倍的关系规律,以本研究的电机为例,电机定子油摩擦损耗是转子的 3.23%。

(2) 从电机内流场结果分析中可以得到,转速和切应力的仿真结果与近似解析式的值相近,证明定子油摩擦损耗近似解析式的准确与合理。且流体黏度只影响了流体对定、转子面的切应力,黏度越大,切应力越大,而对气隙中流体流速的影响微乎其微。

(3) 电机温度场中,电机最高温升为 47.45 °C,相比于正常温度场分析,考虑定子油摩擦损耗时电机最高温升要高出 1.18 °C,说明定子油摩擦损耗对温升具有一定的影响,电机的最高温升增高 2.5%,在温度场分析中不可忽略,其使温度场结果更加精准。

【参考文献】

- [1] 张晓莉,杨永超,张晓蓉,等. 潜水电泵在生产中的应用[J]. 科技与企业,2013(1): 279.
- [2] 师阿香. 潜水电泵井下工况实时监测系统研究[D]. 西安:西安石油大学,2016.
- [3] CALVERLEY S D, JEWELL G W, SAUNDERS R J. Aerodynamic losses in switched reluctance machines [J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications,2000,147(6): 443.
- [4] 徐永明. 潜油电机机械损耗及隔磁段电磁参数计算分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008.
- [5] 付兴贺,李红艳,林明耀. 永磁-感应子式混合励磁电机转子油摩擦损耗[J]. 电机与控制学报,2015,19(2): 7.
- [6] 张炳义,刘忠奇,冯桂宏. 单元组合潜油永磁电机流热耦合温升模型研究[J]. 石油机械,2015,43(8): 98.

(下转第 12 页)