

真空泵用屏蔽式永磁同步电机电磁场-温度场 互相迭代计算方法

穆海琦, 周舒昊, 于添昊, 伦淑娴*

(渤海大学 控制科学与工程学院, 辽宁 锦州 121210)

Electromagnetic Field-Temperature Field Iterative Calculation Method of Canned Permanent Magnet Synchronous Motor for Vacuum Pump

MU Haiqi, ZHOU Shuhao, YU Tianhao, LUN Shuxian*

(School of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121210, China)

Abstract: The shielded permanent magnet synchronous motor for vacuum pump is seriously heated, so it is of great significance to accurately predict its temperature at the design stage for the safe and stable operation of the vacuum pump system. In view of the fact that the current two-way coupling calculation method of electromagnetic field-temperature field of motor can only consider the influence of temperature on the physical properties of motor materials, a mutual iterative calculation method of electromagnetic field-temperature field of motor is proposed. This method can not only consider the influence of temperature on the loss of motor and the magnetic properties of permanent magnet, but also consider the influence of temperature on the thermal conductivity and heat dissipation capacity of motor components, so that the prediction of electromagnetic field and temperature field of motor is more in line with the actual situation. Taking a 1.5 kW shielded permanent magnet synchronous motor as the research object, the electromagnetic performance and temperature characteristics of the motor are analyzed by using the proposed method, and the analysis results are compared with the electromagnetic thermal two-way coupling calculation results. In addition, the influence of ambient temperature on the temperature rise of the motor is studied by using the proposed mutual iteration method. This study can not only provide a theoretical basis for the optimal design of the shielded permanent magnet synchronous motor, but also provide a reference for its operational safety and reliability.

Key words: canned permanent magnet synchronous motor (CPMSM); electromagnetic field; temperature field; mutual

iteration method

摘 要: 真空泵用屏蔽式永磁同步电机发热严重, 因此在设计阶段准确预测其温度对于真空泵系统的安全稳定运行具有重要意义。针对当前电机电磁场-温度场双向耦合计算方法只能考虑温度对电机材料物理性质参数的影响, 提出了一种电机电磁场-温度场互相迭代计算方法。该方法不仅能够考虑温度对电机损耗和永磁体磁性能的影响, 还能够考虑温度对电机部件材料导热能力和散热能力的影响, 使电机电磁场和温度场预测更加符合实际情况。以一台 1.5 kW 屏蔽式永磁同步电机作为研究对象, 基于提出的方法对电机的电磁性能和温度特性进行分析, 并将分析结果与电磁热双向耦合计算结果进行了对比。此外还利用提出的互相迭代法分析了环境温度对电机温升的影响。该研究不仅可以为屏蔽式永磁同步电机优化设计提供理论依据, 还可以为其运行安全性和可靠性提供参考。

关键词: 屏蔽式永磁同步电机 (CPMSM); 电磁场; 温度场; 互相迭代法

0 引言

真空泵凭借其安全、高效以及完全无泄漏等优点被广泛应用于化工、集成电路制造及核工业等领域^[1]。为了提高真空泵驱动系统效率, 当前真空泵通常采用屏蔽式永磁同步电机驱动, 与常规永磁同步电机相比, 屏蔽式永磁同步电机在电机定子内圆包含一个屏蔽套来防止真空泄漏。该屏蔽套固定于定子铁心内圆, 在旋转磁场作用下, 产生额外的涡流损耗, 从而引起电机温度升高。此外真空泵用屏蔽式永磁同步电机的转子处于真

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61773074)

National Natural Science Foundation of China (61773074)

空环境,散热条件差,因此相较于常规的永磁同步电机,屏蔽式永磁同步电机定子发热严重^[2]。因此准确计算真空泵用屏蔽式永磁同步电机温度场对于电机电磁性能的预测以及提高电机安全可靠性能具有重要意义^[3]。

科研人员针对屏蔽式永磁同步电机温度场计算开展了大量研究。在文献[4]中,郭纯治对屏蔽电机进行温度场建模,利用有限元软件,得到屏蔽电机温度分布图以及各部件温度随时间变化的曲线。在文献[5]中,庄海军提出了带有补偿单元的热网络模型,可以快速的计算出电机各部件的温升,还利用有限元法对提出的模型进行了验证。在文献[6]中,王晓远等人建立了等效热网络温度场分析模型和三维有限元模型,利用轮毂电机温升实验,验证了等效热网络法和有限元法的有效性。然而上述研究采用的都是电磁-热单向耦合,影响温度计算精度。这样会导致电机温升计算与实际结果相比仍有误差。

为了进一步提高电机温度计算准确性,文献[7]提出了电磁场与温度场双向耦合计算方法,该方法能够充分考虑电机发热对电机电磁场的作用。研究结果表明双向耦合法相比于单向耦合法,温度计算精度提高了8.4%。文献[8]通过提出一种可以同时考虑温度场和电磁场的交流永磁电机多物理场计算方法,得出了温度变化对电机参数设计影响规律,分析了电机在大温差环境下的输出能力。文献[9]提出了一种双向磁热耦合计算方法,该方法考虑了电机温升对电磁场的影响,温升预测比单向耦合法更准确,但与实际结果相比,依然存在较大误差。

然而电机运行是一个多物理场耦合过程。因为电机材料的导热系数与电机散热能力都与电机自身温度相关,且温度越高,影响越大^[10]。然而,目前关于电机温度计算时考虑温度对电机传热影响的研究较少。

因此,针对发热较为严重的真空泵用屏蔽式永磁同步电机,本文在基于现有电磁场-温度场双向耦合方法的基础上,提出一种能够考虑温度对电机传热影响的互相迭代计算方法。该方法能够充分反应电机传热的实际过程,能够有效提高电机温度预测精度,对于保证电机安全可靠运行具有重要意义。同时本文的研究可以为屏蔽式永磁

同步电机受环境温度影响的温升计算提供重要的方法指导。

1 电磁热互相迭代计算方法

电磁热互相迭代计算方法是一种既可以考虑温度对电机电磁性能的影响,又能考虑温度对电机散热能力影响的计算方法。

1.1 流程图

本文提出的互相迭代法计算流程如图1所示。

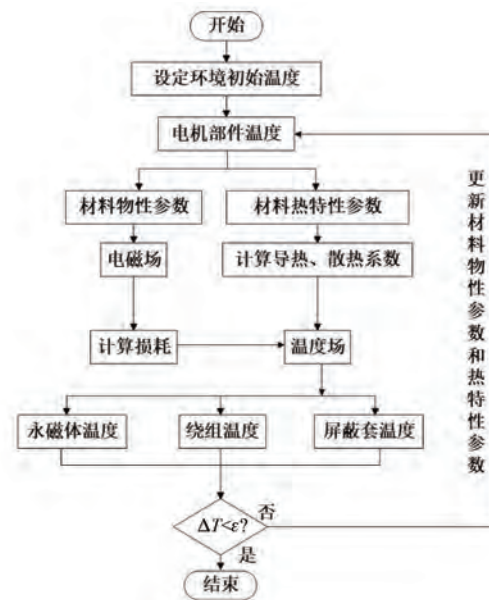


图1 电磁热互相迭代计算方法流程

Fig. 1 Electromagnetic heat mutual iterative calculation method flow chart

根据图1,电磁热互相迭代计算方法的步骤为:(1)首先设定环境初始温度;(2)根据初始温度确定电机材料的物性参数和热特性参数;(3)求解电磁场获得电机各部件损耗;(4)在上述条件基础上对电机温度场进行求解,获得电机各部件温度;(5)电机各部件温度与上一次计算的温度差值若小于阈值则计算结束,否则更新温度数据进行迭代计算,直至满足计算精度要求;(6)重复步骤(3)、(4)、(5),迭代循环,直到符合误差要求。

在迭代计算过程中考虑电机部件温度对材料电磁物性参数和热特性参数的影响,电磁性能影响的参数包括损耗(铜耗、永磁体涡流损耗、屏蔽套损耗)、永磁体的剩磁密度和矫顽力以及屏蔽套电阻率等。对热特性影响的参数包括材料导热

系数和散热系数。以下分别介绍温度对电磁物性参数和热特性参数的影响。

1.2 温度对电磁物性参数的影响

(1) 对铜耗的影响

铜耗计算式如下^[11]:

$$P_{Cu} = mI^2R(t) \quad (1)$$

式中: m 为绕组相数; I 为电流有效值; R 为每相绕组的电阻值。

由于永磁同步电机功率密度高,其在工作过程中温升较快,这会引起绕组阻值的增加,电阻随绕组温度变化的关系为^[12]

$$R(t) = R_0[1 + \alpha_0(t - t_0)] \quad (2)$$

式中: R_0 为参考电阻值; α_0 为导体温度系数。

(2) 对永磁体涡流损耗的影响

永磁体涡流损耗计算式如下^[13]:

$$P_{eddy} = \int_V \frac{|J|^2}{\sigma} dV \quad (3)$$

式中: J 为涡流密度; σ 为永磁体电导率; V 为永磁体体积。

永磁体剩磁参数与温度之间的计算式为^[14]

$$Br_{t_1}(t_1) = Br_{t_0} \left[1 + \frac{\alpha_{Br}}{100}(t_1 - t_0) \right] \quad (4)$$

永磁体矫顽力参数与温度之间的计算式为^[15]

$$Hr_{t_1}(t_1) = Hr_{t_0} \left[1 + \frac{\alpha_{Br}}{100}(t_1 - t_0) \right] \quad (5)$$

式中: Br 为永磁体的剩磁; α_{Br} 为永磁体剩磁密度的可逆温度系数; t_0 为设定的环境初始温度; t_1 为上一次迭代计算后永磁体的温度; Br_{t_0} 为 t_0 温度下的永磁体剩磁; Br_{t_1} 为 t_1 温度下的永磁体剩磁; Hr_{t_0} 为 t_0 温度下的永磁体矫顽力参数; Hr_{t_1} 为 t_1 温度下的永磁体矫顽力参数。

(3) 对屏蔽套损耗的影响

定子屏蔽套损耗简化计算式为^[16]

$$P_{can} = \frac{K \cdot B_s^2 \cdot l_1 \cdot D_1^3 \cdot n_1^2 \cdot \delta_1}{\rho} \times 10^{-10} \quad (6)$$

式中: B_s 为气隙磁通密度最大值; n_1 为电机转速; l_1 为铁心长度; D_1 为定子内径; δ_1 为定子屏蔽套厚度; ρ 为屏蔽套材料的电阻率; $K=0.25 \sim 0.43$ 。

综上介绍了温度对电机电磁物性参数产生的影响,还需注意温度对电机热特性参数产生的重要影响。

1.3 温度对热特性参数的影响

热特性参数主要包括导热系数和散热系数,因此,本文的重点将放在对导热系数和散热系数的分析上。

(1) 温度对导热系数的影响

导热系数是当温度梯度为 1 时,单位时间内通过单位面积的导热量。同一材料的导热系数随温度变化,对于绝大多数物质而言,当材料温度尚未达到熔化或汽化以前,导热系数可以近似地认为是线性规律变化,即^[17]:

$$\lambda = \lambda_0(1 + b \cdot t) \quad (7)$$

空气的导热系数可用式(8)计算^[18]:

$$\lambda_t = \lambda_0 e^{0.00272t} \quad (8)$$

式中: λ_0 为环境温度时的导热系数; b 为试验确定的常数, b 值可以为正值,也可能为负值。对于绝缘材料而言, $b \approx 0.001 \sim 0.02$, t 为迭代计算后得出的温度。

(2) 温度对散热系数的影响

当固体的温度与流体温度不等时,二者之间就有热交换,热量从高温物体传向低温物体。对流散热时,表面散热能力与冷却介质的物理性能、固体表面几何形状、尺寸等因素有关。

如果用空气作为冷却介质,其物理性能比较稳定。忽略散热表面几何尺寸等因素的影响,则可以近似地认为散热系数仅与空气的流速有关。当空气流速在 $5 \sim 25$ m/s 时, α 与流速 v 的关系如下^[19]:

$$\alpha = \alpha_0(1 + k\sqrt{v}) \quad (9)$$

式中: α_0 为发热表面在平静空气中的散热系数; v 为空气吹拂表面的速度; k 为考虑气流吹拂效率的系数。

综上所述,本节从电磁物性和热特性两个方面讨论了温度对电机的影响,列举了电机电磁场和温度场之间相互迭代所需的公式,为进一步分析环境温度对电机电磁场和温度场的影响提供了基础。

2 屏蔽式永磁同步电机温度计算与分析

2.1 电机参数及多物理场计算模型

本文以一台 1.5 kW 屏蔽式永磁同步电机为例,基于互相迭代计算方法对电机进行研究,电机的基本参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

Tab.1 Main parameters of motor

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
额定电压/V	200
定子外径/mm	107
定子内径/mm	49.5
极对数	3
额定转速/(r·min ⁻¹)	9 000
屏蔽套厚度/mm	0.5
转子外径/mm	46.5

根据表 1 参数分别建立了如图 2、图 3 所示的电机电磁场计算模型和电机温度场有限元计算模型。

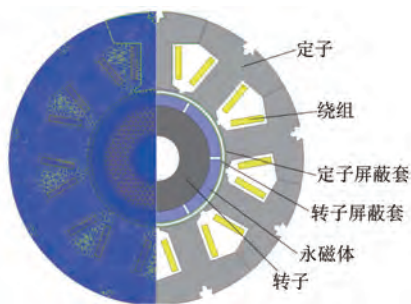


图 2 电机电磁场有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model of motor electromagnetic field



图 3 电机温度场有限元计算模型

Fig. 3 Finite element calculation model diagram of motor temperature field

然后在两种计算模型下分别对电机的气隙磁密、感应电动势、损耗、效率和功率因数等参数进行对比分析。

2.2 电机气隙磁密和感应电动势对比分析

在电机中,气隙磁密的分布和强度对电机的性能和效率产生了重要影响。感应电动势则是电机将电能转换为机械能的关键因素。因此,对气隙磁密和感应电动势进行分析对于理解电机的性

能特征、控制和优化具有重要意义。

利用有限元模型,电机的空载气隙磁密变化如图 4 所示。从图 4 中可以观察到,两种方法对气隙磁密的影响趋势基本相似。然而,通过局部放大图像可以明显看出,使用互相迭代法获得的气隙磁密要大于使用双向耦合方法得到的结果。是因为当温度相同时,互相迭代法在考虑电机电磁参数的前提下,还考虑了导热系数和散热系数对电机温升的影响,从而使电机具备更出色的导热性能,促使电机温度降低,明显增加了永磁材料的剩磁,提高了气隙磁密。对比局部放大图像可知,双向耦合法得到的气隙磁密为 0.646 T,而互相迭代法得到的气隙磁密为 0.649 T,两者相差仅 0.005 T,约为 0.5%。

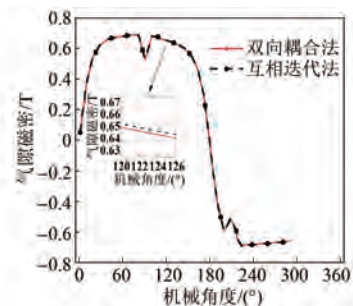


图 4 电机气隙磁密对比

Fig. 4 Comparative analysis of air gap flux density of motor

图 5 为空载反电动势对比波形图。图 5 中两种方法的空载反电动势基本一致,但从局部放大图像中可以看出,双向耦合法的空载反电动势为 104.27 V,互相迭代法的空载反电动势为 104.80 V,相差 0.53 V,约 0.5%。对比图 4 空载气隙磁密可以看出,两种方法得到的气隙磁密和空载反电动势相差均约为 0.5%,所以迭代方法对电

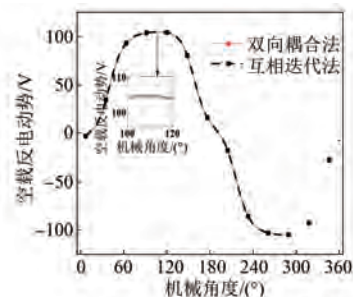


图 5 电机空载反电动势对比

Fig. 5 Comparative analysis diagram of no-load back electromotive force of motor

机反电动势的影响与对气隙磁密的影响基本一致。

2.3 电机损耗对比分析

电机运行时,温度升高会导致损耗变化,因此对电机损耗进行准确的分析至关重要。本文所分析的屏蔽式永磁同步电机在运行时产生的损耗主要包括:绕组铜耗、定子铁耗、屏蔽套损耗以及转子涡流损耗。这些损耗转化成热能能在电机内部各部分之间传递,进而影响电机内部温度场的分布。

本文将根据负载率的变化对电机的绕组铜耗、定子铁耗、屏蔽套损耗以及转子涡流损耗进行分析,为下文的效率和功率因数提供依据。电机的铜耗随负载率变化如图 6 所示。

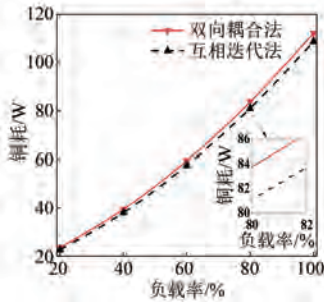


图 6 电机铜耗对比

Fig. 6 Comparative analysis of copper consumption of motor

从图 6 中可以看出,采用两种方法获得的铜耗都随着负载率的增加而增大,但计算结果存在差别。当负载率从 20% 增加至 100% 时,采用双向耦合法铜耗增加了 88.71 W,采用互相迭代法铜耗增加了 86.17 W。当负载率为 100% 时,采用双向耦合法获得的铜耗为 112.21 W,采用互相迭代法获得的铜耗为 108.77 W,此时两者相差最大,相差了 3.15%。在温度相同的情况下,本文采用的互相迭代法产生的铜耗比磁热双向耦合法产生的铜耗小,这是因为采用的互相迭代法在迭代后考虑了导体的导热系数和散热系数的影响,温升较之前未考虑的情况下要低,从而使绕组的电阻值降低。铜耗与绕组的电阻值成正比,所以导致铜耗减小。

电机的铁耗随负载率变化如图 7 所示。从图 7 中可以看出,随着负载率增大,铁耗在不断增大。当负载率从 0 增加至 100% 时,采用双向

耦合法得到的铁耗增加了 5.35 W,采用互相迭代法得到的铁耗增加了 5.28 W。当负载率为 60% 时,采用双向耦合法获得的铁耗为 26.3 W,采用互相迭代法获得的铁耗为 26.5 W,两者相差最大,相差了 0.9%。本文采用的互相迭代法所产生的铁耗更大,这是由于其考虑了温度场中电机材料导热系数和散热系数的影响,得到的铁耗更大。

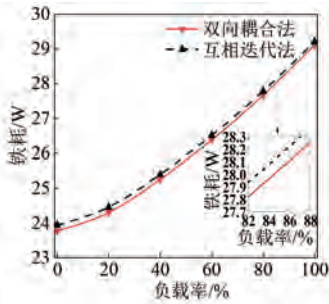


图 7 电机铁耗对比

Fig. 7 Comparative analysis diagram of iron loss of motor

电机的屏蔽套损耗随负载率变化如图 8 所示。从图 8 中可以看出,在负载率为 100% 时,采用互相迭代法获得的屏蔽套损耗为 241.94 W,采用双向耦合法获得的屏蔽套损耗为 244.58 W,两者相差最大,相差了 1.09%。从图中可知采用互相迭代法所产生的屏蔽套损耗更小,而双向耦合法由于并未考虑温度场中导热系数和散热系数的变化,仿真计算得出的屏蔽套损耗较高,没有考虑实际情况的影响。

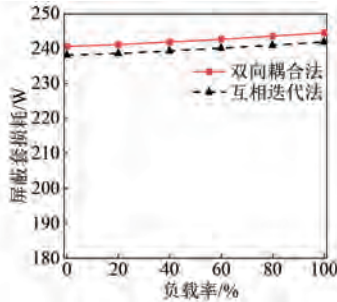


图 8 电机屏蔽套损耗对比

Fig. 8 Comparative analysis diagram of motor shield loss

电机的转子涡流损耗随负载率变化如图 9 所示。从图 9 中可以看出,随着负载率的增大,转子涡流损耗在不断增加。当负载率从 0 增加至 100% 时,采用双向耦合法转子涡流损耗增加了

14.65 W,采用互相迭代法转子涡流损耗增加了14.33 W。当负载率为100%时,采用双向耦合法获得的转子涡流损耗为17.56 W,采用互相迭代法获得的转子涡流损耗为17.15 W,两者相差最大,相差了2.4%。

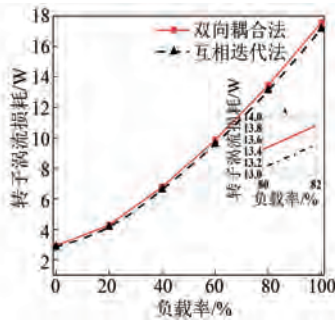


图9 电机转子涡流损耗对比

Fig. 9 Comparative analysis of eddy current loss of motor rotor

图6~图9中分别介绍了各部分损耗与负载率、分析方法之间的关系,这些分析结果将为下文对电机的效率和功率因数进行准确分析提供依据,使结果更贴近实际情况,并为后续电机温度场的分析提供准确性支持。

2.4 电机效率和功率因数对比分析

本节基于互相迭代法和双向耦合法对电机效率和功率因数进行对比分析。图10所示为屏蔽式永磁同步电机效率与负载率的关系,表2所示为两种方法的效率对比列表。

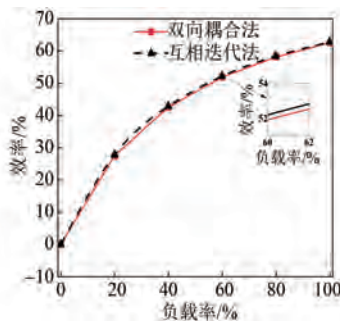


图10 电机效率对比

Fig. 10 Comparative analysis diagram of motor efficiency

从图10中可以看出,电机效率是随负载率的变化而变化的。从表2中可以看出,当负载率为20%时,采用互相迭代法得到的效率为27.539%,采用双向耦合法得到的效率为27.751%,两者相差最大,相差了0.77%。

表2 电机效率对比

Tab. 2 Comparative analysis diagram of motor efficiency

负载率	双向耦合法	互相迭代法	相差 %
0	0	0	0
20	27.539	27.751	0.77
40	42.566	42.836	0.63
60	51.886	52.175	0.56
80	58.129	58.425	0.51
100	62.526	62.823	0.48

屏蔽式永磁同步电机功率因数与负载率的关系如图11所示。从图11中可以看出,当负载率为25%时,采用双向耦合法下电机的功率因数为0.724,采用互相迭代法下电机的功率因数为0.727,两者相差最大,相差了0.5%。在负载率低于20%时,其功率因数升高明显。在负载率为60%~100%时,功率因数趋于稳定。

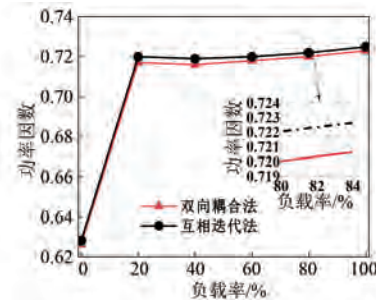


图11 电机功率因数对比

Fig. 11 Comparative analysis diagram of motor power factor

功率因数表示为有功功率与视在功率之比,反映了电力系统的供电能力和线路损耗。等效视在功率的计算式为^[20]

$$S_e = 3U_e I_e \quad (10)$$

功率因数的计算式为^[21]

$$PF_e = \frac{P}{S_e} \quad (11)$$

式中: I_e 和 U_e 分别为电流和电压,且为等效定义值; P 为有功功率。

本节主要对电机损耗与负载率之间的关系进行了分析,为接下来的负载率与效率、功率因数之间的关系分析提供了基础。同时,损耗的数值也将用于下文计算温度场中的生热率,从而实现更准确且实际可行的电机温升计算。

3 环境温度对屏蔽式永磁同步电机温度场影响

3.1 电机温度对比分析

电机的温度变化结果如图 12 所示。从图 12 中可以看出,采用两种方法电机的温度都随负载率的增加而增大,当负载率从 0 增加至 100% 时,采用双向耦合法,电机整体温度升高了 16.881 ℃;采用互相迭代法,电机整体温度升高了 15.419 ℃。当负载率为 100% 时,采用双向耦合法电机的温度为 99.1 ℃,采用互相迭代法电机的温度为 93.2 ℃,两者相差最大,相差了 5.5%。造成这种现象的原因是在环境温度相同的情况下,本文提出的互相迭代法考虑了温度场中导热系数、散热系数的影响,导致温度相对于双向耦合方法更低,更贴近于实际情况,为以后电机电磁特性和热特性提供更为准确的分析。

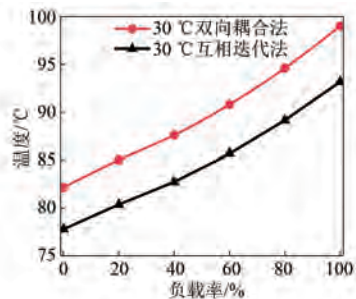


图 12 电机温度对比
Fig. 12 Comparative analysis diagram of motor temperature

3.2 电机温度分布

电机各部件不同方法下的温度如图 13 所示。从图 13 中可以看出,采用磁热耦合法下电机的整体最高温度为 99.02 ℃,永磁体最高温度为 95.55 ℃,绕组绝缘和定子屏蔽套的最高温度为 99.02 ℃;采用互相迭代法下电机的整体最高温度为 93.17 ℃,永磁体最高温度为 90.18 ℃,绕组绝缘和定子屏蔽套的最高温度为 93.17 ℃。造成这种现象的原因是,在环境温度为 30 ℃ 的情况下,磁热耦合法并未考虑电机导热系数和散热系数对电机温升的影响,这才导致了温度升高。

3.3 环境温度对温升的影响

环境温度是电机运行的一个关键参数,会直接影响电机的散热和工作效率。高温环境可能导

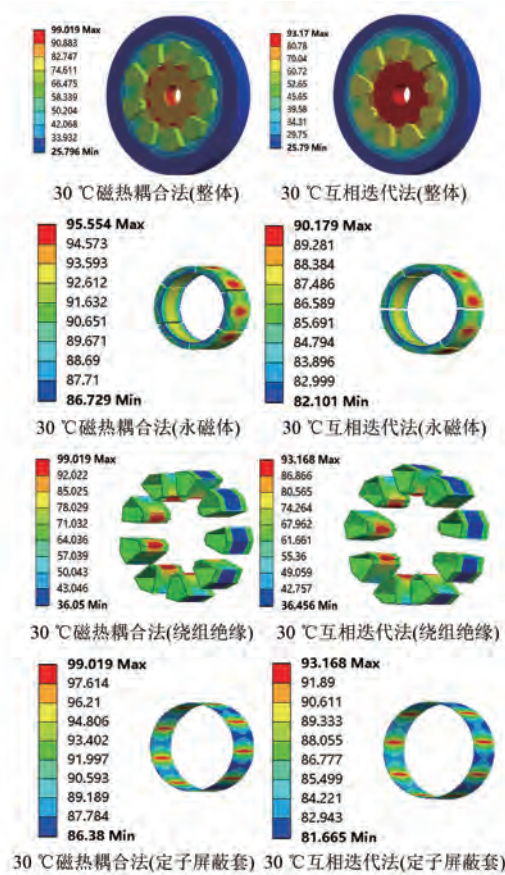


图 13 电机各部分温度分布
Fig. 13 The temperature distribution of each part of the motor

致电机过热,降低效率,甚至缩短电机的寿命。因此,了解电机在不同温度条件下的性能变化是至关重要的。

环境温度与温升之间的关系如图 14 所示。从图 14 中可以看出,当负载率为 100% 时,环境温度为 -30 ℃ 的电机整体温度升高了 66.525 ℃;环境温度为 0 ℃ 时的整体温度升高了 64.624 ℃;环境

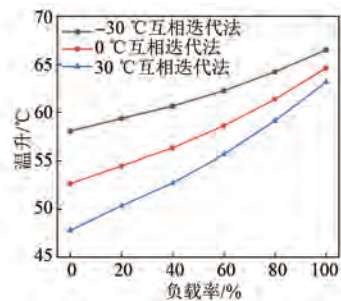


图 14 电机温升对比
Fig. 14 Comparative analysis of motor temperature rise diagram

温度为 30 ℃ 的电机整体温度升高了 63.168 ℃, 此时相差最大。环境温度越低,温升越高。

4 结语

为了提高屏蔽式永磁同步电机温升计算的准确性,本文提出了一种新的互相迭代计算方法,在考虑电机物性参数的同时,还考虑了电机温度场导热系数和散热系数对电机温升的影响。基于这种方法又分析了环境温度对于电机电磁场和温度场的影响,得出如下结论:

(1) 对比传统磁热双向耦合法,本文所提出的互相迭代法可以考虑电机导热系数和散热系数对电机的影响,这样可以使电机温升计算更准确并贴近实际。

(2) 环境温度为 30 ℃ 时,电机整体温度约为 93.17 ℃,温度升高了 63.17 ℃;环境温度为 0 ℃ 时,电机整体温度约为 64.624 ℃,温度升高了 64.624 ℃;环境温度为-30 ℃ 时,电机整体温度约为 36.525 ℃,温度升高了 66.525 ℃。环境温度越低,导致的温升会越高。

参考文献

- [1] 刘敏强. 真空仪器设备应用与发展[J]. 中国仪器仪表, 2017, 9: 21-23.
LIU M Q. The current development of vacuum technology in vacuum equipments and vacuum instruments [J]. China Instrumentation, 2017, 9: 21-23.
- [2] 褚赛. 屏蔽式永磁电机的屏蔽套效应及涡流分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
CHU S. Analysis of can effect and eddy current of canned permanent magnet motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020
- [3] 曹力, 胡岩, 卓亮. 高速永磁屏蔽电机损耗分析与温升研究[J]. 微电机, 2021, 54(4): 11-15+31.
CAO L, HU Y, ZHUO L. Study on loss analysis and temperature rise of high-speed permanent magnet shielded motor [J]. Micromotors, 2021, 54 (4): 11-15+31.
- [4] 郭纯治. 核电用屏蔽电动机的损耗分析与温升计算[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
GUO C Y. Analysis of loss and temperature field of nuclear canned motor pump [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [5] 庄海军. 屏蔽式永磁同步电机电磁与热解析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
ZHUANG H J. Electromagnetic and thermal analysis of canned permanent magnet synchronous motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [6] 王晓远, 高鹏. 等效热网络法和有限元法在轮毂电机温度场计算中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 26-33.
WANG X Y, GAO P. Application of equivalent thermal network method and finite element method in temperature calculation of in-wheel motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 26-33.
- [7] 宋聪. 基于耦合场的永磁伺服电机温升计算研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
SONG C. Research and calculation of temperature rise of permanent magnet servo motor based on coupling field [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [8] 肖利军. 极端环境交流永磁电机特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
XIAO L J. Research on the characteristics of AC permanent magnet motors in extreme environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [9] DING F, WANG A G, ZHANG Q B. Analysis of unidirectional and bidirectional magnetic-thermal coupling of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Vibroengineering, 2022, 24 (8): 1541-1555.
- [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): 42-47.
CHEN H Y, YANG M F. Coupling simulation of 3D electromagnetic field and thermal field of asynchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(1): 42-47.
- [11] 冯威, 杨松, 张炳义. 高温超细长潜油永磁电机温升研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 50-56.
FENF W, YANG S, ZHANG B Y. Research on temperature rise of high-temperature ultra-slim long submersible permanent magnet motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(2): 50-56.

- [12] 时培成, 夏仙阳, 陈晨, 等. 基于场路耦合方法的永磁同步电机温度场研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 425-434.
SHI P C, XIA X Y, CHEN C, et al. Temperature field of permanent magnet synchronous motor based on coupled field-circuit [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 425-434.
- [13] 朱龙飞, 祝天利, 于慎波, 等. 一种气隙磁导谐波引起的永磁体涡流损耗的解析计算方法[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(5): 10-16+25.
ZHU L F, ZHU T L, YU S B, et al. Analytical approach for calculation of eddy current losses in magnets caused by permeance harmonics in air gap [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(5): 10-16+25.
- [14] 陆哲敏, 郭亮, 鲁文其. 双边圆筒型永磁直线电机磁热网络耦合建模方法研究[J]. 轻工机械, 2023, 41(5): 67-78.
LU Z M, GUO L, LU W Q. Research on coupled magnetic-thermal network modeling of double-sided permanent magnet tubular machine [J]. Light Industry Machinery, 2023, 41(5): 67-78.
- [15] 欧金生, 沈贤锋, 于文昊, 等. 大功率高速永磁电机的电磁设计与损耗分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(6): 46-51.
OU J S, SHEN X F, YU W H, et al. Electromagnetic design and loss analysis of high-power and high-speed permanent magnet motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(6): 46-51.
- [16] 张晓晨, 李伟力, 曹君慈. 屏蔽电机屏蔽损耗与电机性能的计算与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(9): 1422-1426.
ZHANG X C, LI W L, CAO J C. Calculation and analysis for the can loss and performance of canned motors [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(9): 1422-1426.
- [17] 王宝, 安跃军, 王光玉, 等. 真空干泵驱动用电机转子热问题对比分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 53-59.
WANG B, AN Y J, WANG G Y, et al. Comparative analysis of rotor heat problem of drive motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(5): 53-59.
- [18] 邵昊. 电动汽车轮毂电机振动及温升分析研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
SHAO H. Research on vibration and temperature rise of in-wheel motor for electric vehicle [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [19] 陈利辉, 王瑾, 于占洋, 等. 轴向通风内置式永磁同步电机流固耦合传热计算分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(9): 55-61.
CHEN L H, WANG J, YU Z Y, et al. Calculation and analysis of fluid-solid coupling heat transfer of axial ventilation interior permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(9): 55-61.
- [20] 高雨翔, 蔡奇新, 徐文林. 基于牵引负荷负序功率潮流计算及电能计量方式研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 193-200.
GAO Y X, CAI Q X, XU W L. Study on negative sequence power flow calculation and electric energy metering mode of traction load [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 193-200.
- [21] 杨雪淞, 黄文, 邓云川. 电气化铁路新型功率因数计量方法[J]. 电气化铁道, 2020, 31(4): 19-22.
YANG X S, HUANG W, DENG Y C. Power factor electrified railway load characteristics method [J]. Electric Railway, 2020, 31(4): 19-22.

收稿日期:2023-11-02

收到修改稿日期:2023-11-29

作者简介:

穆海琦(2000-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机设计及多物理场研究,2022008007@qqmail.bhu.edu.cn;

*通信作者:伦淑娴(1972-),女,博士,教授,研究方向为非线性系统的控制、智能控制和电机故障诊断等, lunshuxian@qqmail.bhu.edu.cn.

Electromagnetic Field-Temperature Field Iterative Calculation Method of Canned Permanent Magnet Synchronous Motor for Vacuum Pump

MU Haiqi, ZHOU Shuhao, YU Tianhao, LUN Shuxian *

(School of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121210, China)

Key words: canned permanent magnet synchronous motor (CPMSM); electromagnetic field; temperature field; mutual iteration method

The shielded permanent magnet synchronous motor for vacuum pump is seriously heated, so it is of great significance to accurately predict its temperature at the design stage for the safe and stable operation of the vacuum pump system. In view of the fact that the current two-way coupling calculation method of electromagnetic field-temperature field of motor can only consider the influence of temperature on the physical properties of motor materials, this paper proposes a mutual iterative calculation method of electromagnetic field-temperature field of motor. This method can not only consider the influence of temperature on the loss of motor and the magnetic properties of permanent magnet, but also consider the influence of temperature on the thermal conductivity and heat dissipation capacity of motor components, so that the prediction of electromagnetic field and temperature field of motor is more in line with the actual situation.

The finite element calculation model of the electromagnetic field of the motor is shown in Fig.1.

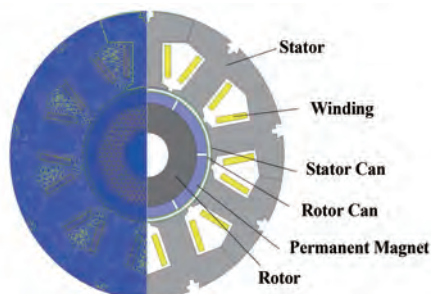


Fig. 1 Finite element calculation model of motor electromagnetic field

Ambient temperature is a key parameter of motor operation, which will directly affect the heat dissipation and working efficiency of the motor. High temperature environment may lead to motor overheating, reduce efficiency, and even shorten the life of the motor. Therefore, it is very important to understand the performance changes of the motor under different temperature conditions. The relationship between ambient temperature and temperature rise is shown in Fig.2.

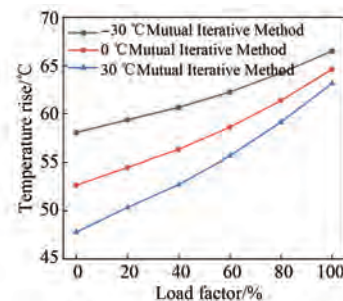


Fig. 2 Comparative analysis of motor temperature rise diagram

The mutual iteration method proposed in this paper focuses on the influence of temperature on the thermal characteristic parameters of the motor. And it considers the influence of thermal conductivity and heat dissipation coefficient in the temperature field, resulting in a lower temperature relative to the two-way coupling method, which is closer to the actual situation and provides accuracy for the later analysis of the electromagnetic and thermal characteristics of the motor.