

屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机电磁场和温度场的影响研究

于添昊, 李明, 伦淑娴*

(渤海大学 控制科学与工程学院, 辽宁 锦州 121210)

Study on the Influence of Can Sleeve Material on the Electromagnetic Field and Temperature Field of Canned Permanent Magnet Synchronous Motor

YU Tianhao, LI Ming, LUN Shuxian*

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

Abstract: Aiming at the problem of low computational accuracy when analyzing the electromagnetic field and temperature field of canned permanent magnet synchronous motor by the directional coupling method, a magneto-thermal bidirectional coupling method is proposed. Firstly, a magneto-thermal coupling computational model is established. Secondly, the influence of the can sleeve material on the motor performance is analyzed by the magneto-thermal bi-directional coupling method, and the calculation results are compared with the directional coupling method. Finally, a three-dimensional model of the motor is established and the electromagnetic field and three-dimensional temperature field are analyzed using finite element software. The results show that the proposed magneto-thermal bi-directional coupling calculation method can effectively improve the calculation accuracy of electromagnetic field and temperature field. In addition, the can sleeve using non-conductive non-magnetic materials can effectively improve the efficiency of the canned permanent magnet synchronous motor and reduce the temperature rise of the motor. The proposed method not only provides a reference for the design of canned permanent magnet synchronous motor, but also is of great significance to ensure the efficient and reliable operation of the motor.

Key words: can sleeve material; electromagnetic field; temperature field; magneto-thermal bi-directional coupling

摘要: 针对单向耦合法分析屏蔽式永磁同步电机电磁

场和温度场时计算精度低的问题,提出了一种磁热双向耦合法。首先,建立了磁热耦合计算模型。其次,采用双向耦合法分析了屏蔽套材料对电机性能的影响,并与单向耦合计算结果进行了比较。最后,建立了电机三维模型,利用有限元软件进行了电磁场和三维温度场分析。研究结果表明所提的磁热双向耦合计算方法可以有效提高电磁场和温度场的计算精度,此外屏蔽套采用不导电不导磁材料可有效提高屏蔽式永磁同步电机效率,降低电机温升。这不仅为屏蔽式永磁同步电机的设计提供了参考,同时对于保证电机高效和可靠运行具有重要意义。

关键词: 屏蔽套材料; 电磁场; 温度场; 磁热双向耦合

0 引言

真空技术与人们的生活紧密相关,在航空领域、电子芯片、精细化工、光伏产业、生物制药甚至食品包装等方面有着卓越表现^[1]。真空泵以其效率高、可靠性高及振动噪声小等优点满足了人们对真空环境的需求,是获得真空的重要设备^[2]。实际应用需要根据工作压力范围和工作要求来设计不同类型的真空泵^[3]。在工业生产中,通常将真空泵与电机设计成一体结构。真空泵中配置的电机为屏蔽电机。屏蔽电机具有电机损耗小、功率密度大、体积小、噪声低和安全可靠等优点,因此其应用越来越广泛^[4]。

屏蔽电机与传统电机的区别在于屏蔽电机内部装有屏蔽套,因此在电机气隙处具有良好的密封性,能防止大气或者其他物质进入真空腔体,避免污染电机。屏蔽套材料可根据材料的导磁性和

基金项目: 辽宁省教育厅项目(LJKZ1020)

The Education Department Project of Liaoning Province, China
(LJKZ1020)

导电性分为导电不导磁、既导电又导磁以及既不导磁又不导电三种类型。选用电阻率高的材料能够抑制屏蔽套损耗、提高电机效率,但电阻率高的材料其导磁和导热性能差,会影响电机电磁性能及温度分布。文献[5]研究了屏蔽套材料电导率对屏蔽套损耗的影响,发现材料的电导率越大,产生的屏蔽套损耗越大,且屏蔽套厚度越大涡流损耗也越大。文献[6]以改善屏蔽电机综合性能为目的,研究了屏蔽套中复合材料层对屏蔽电机电磁场和电机性能的影响。文献[7]基于电磁感应定律,推导了屏蔽套损耗计算式,该计算式将屏蔽套损耗分解为各次谐波损耗,将解析解的结果加入到新的热网络模型中,以准确预测屏蔽套的温度分布。文献[8]从永磁体和线圈两个磁源产生涡流的角度分析了屏蔽电机屏蔽套上涡流及涡流损耗分布。文献[9]分析了不同材料转子护套对高速永磁电机启动性能、电机转矩、输出性能和损耗的影响,文中所用的碳纤维材料不导磁且电导率可以忽略不计,使用该材料作为转子护套能有效降低损耗,提高电机效率。文献[10]对高速永磁屏蔽电机屏蔽套涡流损耗的准确计算和敏感性因素进行了分析,发现电导率越小,产生的涡流损耗越小,并分析了非金属材料玄武岩作为屏蔽套材料时电机的磁场,玄武岩不导磁、不导电且绝缘性好,用该材料作为屏蔽套的电机损耗小、效率高。文献[11]对比了不导磁不导电材料 HGW2085 和不锈钢材料作为转子屏蔽套材料时的磁场。由于 HGW2085 材料绝缘性好,转子屏蔽套部位无涡流损耗,转子总损耗较小。文献[12]基于磁-热耦合法分析电机温度,发现在护套基础上加装铜屏蔽层可以抑制谐波从而减小转子涡流损耗。文献[13-14]针对真空干泵用电机发热严重问题,用单向耦合法分析了电机温度场。文献[15]采用瞬态电磁场-温度场双向耦合逐次逼近稳态温升的方法,分析了不同功率点下电机的温升分布。文献[16]采用单向耦合和双向耦合两种方法计算永磁同步电机的损耗及温升,并与试验结果进行对比,发现双向耦合法计算结果准确率更高。

上述文献分析了屏蔽套材料对电机性能的影响,重点集中于材料导磁导电性对屏蔽套涡流及损耗的影响,而对不导磁不导电材料的研

究较少。并且对于屏蔽式永磁电机电磁场和温度场的耦合方法多为单向耦合,而双向耦合的计算精度更高。基于此,本文以一台 1.5 kW、9 000 r/min 的屏蔽式永磁电机为例,根据磁热耦合计算模型,基于不考虑温度对绕组和永磁体影响的单向耦合和考虑温度对绕组和永磁体影响的双向耦合两种方法对比分析了定子屏蔽套材料分别为 SUS304、SUS430 和氧化锆时电机的气隙磁密和感应电动势,并分析在不同负载率下电机的损耗和效率。最后根据电磁场和温度场耦合分析了不同定子屏蔽套材料下电机整体及各部分的温度分布。本研究不仅为屏蔽式永磁同步电机的设计提供了参考,同时对保证电机高效可靠运行具有重要意义。

1 磁热耦合计算模型

1.1 电磁场计算模型

采用有限元法计算电机电磁模型,可以得到电机电磁场的分布。有限元控制方程和边界条件表示如下^[17]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = - J_s + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \\ A_z|_{\Gamma} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_z 为磁动势; ν 为磁阻率; σ 为电导率; J_s 为电流密度; Γ 为外边界。

1.2 温度场计算模型

屏蔽电机的温度场可以用三维热传导方程描述^[18]:

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

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 为电机绝热边界面; S_2 为电机散热边界面; T_e 为 S_2 周围介质的温度; α 为 S_2 的散热系数; K 为 S_1 和 S_2 的法向导热系数; K_x 、 K_y 、 K_z 分别为电机各介质在 x 、 y 、 z 方向的导热系数。当 $\partial T / \partial \tau = 0$, 说明温度趋于稳定, 可求解得到三维稳态温度场的数学模型。

1.3 双向耦合计算模型

电机运行会带来损耗,包括铁耗、绕组铜耗及定子屏蔽套涡流损耗等,损耗会引起温升。电机温升会导致相关材料参数发生变化,进而影响电磁和温度结果。温升还会影响定子绕组的阻值,而绕组阻值的变化又会影响损耗。并且永磁体的剩磁感应强度和矫顽力也都是关于温度的函数,温度与绕组阻值的关系式如下:

$$R_{t_1} = R_{t_0} [1 + \alpha(t_1 - t_0)] \quad (3)$$

式中: t_0 为电机初始温度; t_1 为电机工作时的绕组温度; α 为电阻随温度变化的温度系数; R_{t_0} 、 R_{t_1} 分别为温度在 t_0 、 t_1 时的绕组阻值。

温度对永磁体磁性能的影响可由式(4)和式(5)表示:

$$B_{n_1} = \left(1 - \frac{IL}{100}\right) \left[1 + (t_1 - t_0) \frac{\alpha_{B_r}}{100}\right] B_{n_0} \quad (4)$$

$$H_{ct_1} = \left(1 - \frac{IL}{100}\right) \left[1 + (t_1 - t_0) \frac{\alpha_{H_c}}{100}\right] H_{ct_0} \quad (5)$$

式中: B_{n_0} 、 B_{n_1} 分别为温度在 t_0 、 t_1 时的剩余磁感应强度; t_1 为电机工作时的环境温度; α_{B_r} 为剩余磁感应强度随温度变化的温度系数; H_{ct_0} 、 H_{ct_1} 分别为温度在 t_0 、 t_1 时的计算矫顽力; α_{H_c} 为计算矫顽力随温度变化的温度系数; IL 为剩余磁感应强度的不可逆损失率。

磁热双向耦合模型考虑电机电磁场和温度场间的相互影响,比电磁场到温度场的单向耦合计算更准确。双向耦合计算流程图如图1所示。

由图1可知,基于磁热双向耦合计算屏蔽电机温升的流程,主要分为以下几个步骤:

(1) 建立屏蔽电机模型,输入材料参数,在电磁场中进行损耗计算;

(2) 考虑损耗在电机中的位置分布,将步骤1计算的损耗结果作为热源赋给温升计算模型,进行温度计算;

(3) 将温度计算结果进行对比,若两次计算温度误差 $\geq 1\%$,温度计算结果返回步骤1,更改与温度相关的材料属性,再进行损耗计算。反复迭代计算,直至误差 $<1\%$,双向耦合计算完成。

1.4 电机模型

本文以一台1.5 kW、9 000 r/min的屏蔽式永磁同步电机为例研究了采用三种不同材料的定子

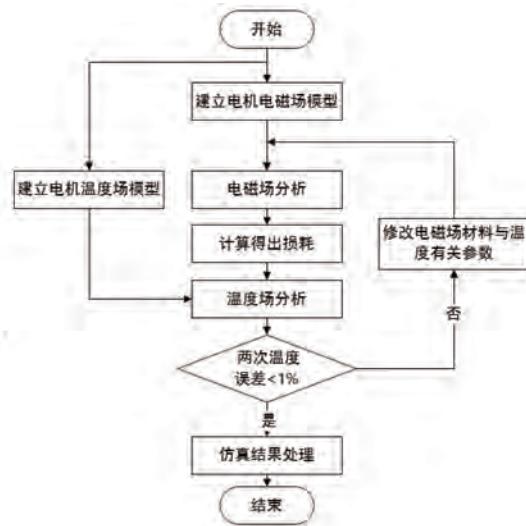


图1 磁热双向耦合计算流程

Fig. 1 Magneto-thermal bi-directional coupling calculation process

屏蔽套时电机的磁热耦合场。图2为真空泵用屏蔽电机的二维物理模型,主要由定子铁心、定子绕组、转子铁心以及屏蔽套构成。表1为屏蔽电机的部分参数表。屏蔽电机与传统永磁电机相比,除了关键尺寸需与泵体相匹配之外,在定转子之间加装定子屏蔽套,以确保介质无泄漏。

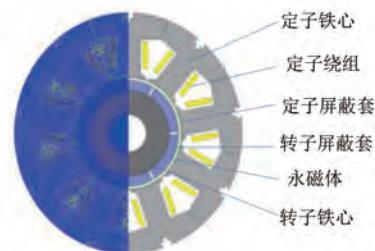


图2 真空泵用屏蔽电机的二维物理模型

Fig. 2 Two-dimensional physical model of canned motor for vacuum pumps

表1 电机部分参数表

Tab. 1 Motor part parameters table

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
极数	6
定子外径/mm	107
转子外径/mm	49.5
额定转速/(r·min⁻¹)	9 000

文中所用的永磁体材料牌号为N38UH,永磁体在不同温度下的退磁曲线如图3所示。

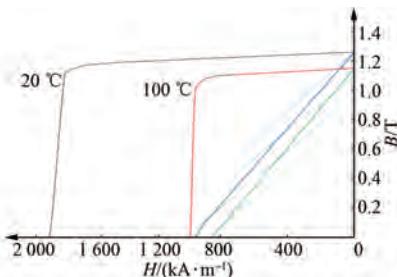


图 3 永磁体材料退磁曲线

Fig. 3 Demagnetization curves of permanent magnet material

2 屏蔽套材料对电机电磁场的影响

基于不考虑温度对绕组和永磁体材料参数影响的单向耦合和考虑温度对绕组和永磁体材料参数影响的双向耦合两种磁热耦合方法,运用有限元软件分析屏蔽电机定子屏蔽套分别采用 SUS304、SUS430 和氧化锆三种不同材料时的电机电磁场。在额定负载下,分析电机气隙磁密和感应电动势;在不同负载率下,分析电机损耗及效率。三种材料中,SUS304 是一种导电但不导磁的不锈钢;SUS430 是典型的导磁型不锈钢,导电、耐腐蚀且价格较低;氧化锆在常温下既不导电也不导磁,其韧性好、耐磨性好、熔点高且化学性能稳定,是良好的耐火材料,在工业生产中应用广泛。

2.1 屏蔽套材料对气隙磁密的影响

电机的气隙磁密影响电机的性能,对电机的设计及制造有重要意义。屏蔽电机加入了定子屏蔽套和转子屏蔽套,屏蔽套材料的导磁、导电性会对气隙磁场产生影响。定子屏蔽套为 SUS304、SUS430 和氧化锆时,采用单向耦合和双向耦合法得到的气隙磁密波形如图 4、图 5 和图 6 所示;采用双向耦合法计算得到的气隙磁密谐波含量如图 7 所示。

由图 4 和图 5 可知,双向耦合和单向耦合法得到的气隙磁密存在差异。当定子屏蔽套材料为 SUS304 时,双向耦合法计算的气隙磁密基波幅值较单向耦合法降低 12.2%;当定子屏蔽套材料为 SUS430 时,双向耦合法计算的气隙磁密基波幅值较单向耦合法降低 14.8%。这是因为温度变化会改变永磁体剩磁密度和矫顽力,导致磁场发生变化,因此双向耦合法更接近实际结果^[19]。

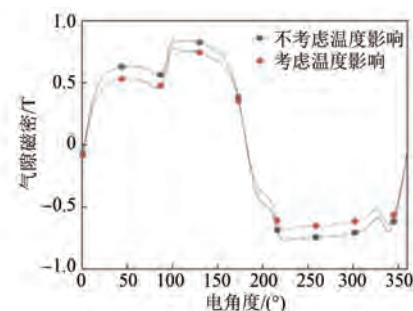


图 4 屏蔽套材料为 SUS304 时的气隙磁密波形

Fig. 4 The air gap flux density waveforms when the can sleeve material is SUS304

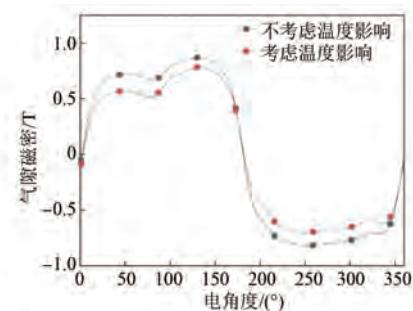


图 5 屏蔽套材料为 SUS430 时的气隙磁密波形

Fig. 5 The air gap flux density waveforms when the can sleeve material is SUS430

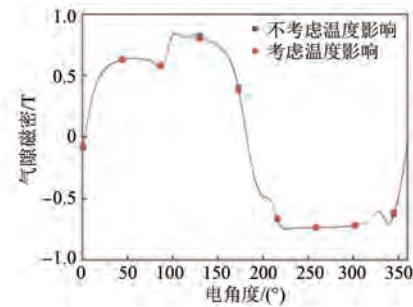


图 6 屏蔽套材料为 氧化锆时的气隙磁密波形

Fig. 6 The air gap flux density waveforms when the can sleeve material is zirconia

由图 6 可知,屏蔽套采用氧化锆时,气隙磁密受温度影响较小,相较于单向耦合法,双向耦合法计算的气隙磁密基波幅值降低 0.8%。由图 7 可知,屏蔽套采用氧化锆时,计算出的气隙磁密基波幅值比用 SUS304 时增加 13%,比用 SUS430 时增加 8.7%。

2.2 屏蔽套材料对感应电动势的影响

由电磁感应定律可知,感应电动势的大小直接影响电机的效率和功率输出。对于屏蔽式永磁同步电机,定子屏蔽套材料不同,感应电动势波形

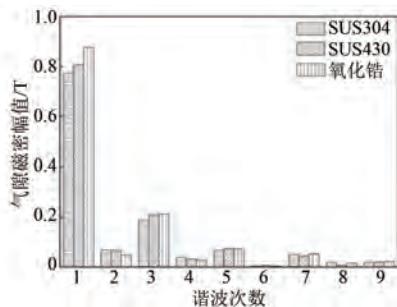


图 7 双向耦合法得到的气隙磁密谐波含量

Fig. 7 The harmonic content of air gap flux density obtained by bi-directional coupling

也不同。图 8、图 9 和图 10 分别为定子屏蔽套材料为 SUS304、SUS430 和氧化锆时的空载感应电动势波形图, 图 11 为通过双向耦合法计算得到的感应电动势谐波含量。

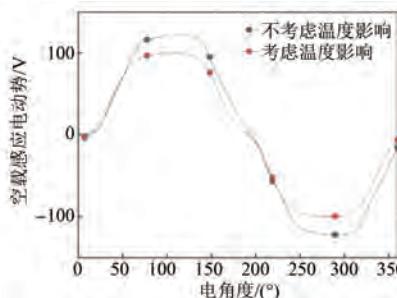


图 8 屏蔽套材料为 SUS304 时的感应电动势波形

Fig. 8 The induced electromotive force waveforms when the can sleeve material is SUS304

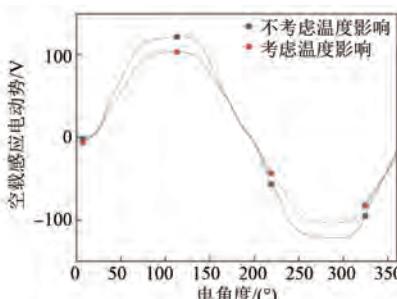


图 9 屏蔽套材料为 SUS430 时的感应电动势波形

Fig. 9 The induced electromotive force waveforms when the can sleeve material is SUS430

由图 8、图 9 和图 10 可知, 当定子屏蔽套材料为 SUS304 时, 双向耦合法计算的空载感应电动势幅值较单向耦合法降低 12.6%; 当定子屏蔽套材料为 SUS430 时, 双向耦合法计算的空载感应电动势幅值较单向耦合法降低 16%; 当定子屏蔽套材料为氧化锆时, 双向耦合法计算的空载感应

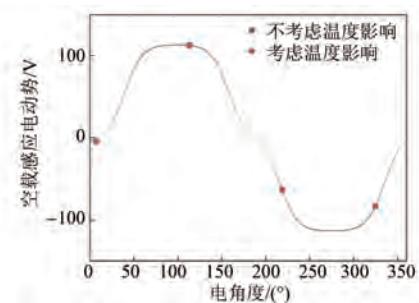


图 10 屏蔽套材料为氧化锆时的感应电动势波形

Fig. 10 The induced electromotive force waveforms when the can sleeve material is zirconia

电动势幅值较单向耦合法降低 0.9%。由图 11 可知, 定子屏蔽套采用氧化锆时, 双向耦合法计算出的空载感应电动势幅值比采用 SUS304 时增加 13.7%, 比采用 SUS430 时增加 11%。

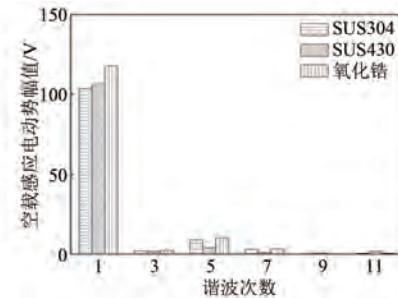


图 11 双向耦合法得到的感应电动势谐波含量

Fig. 11 The harmonic content of induced electromotive force obtained by bi-directional coupling

2.3 屏蔽套材料对各部分损耗及效率的影响

屏蔽式永磁电机的损耗主要包括定子铁心损耗、绕组铜耗、定子屏蔽套涡流损耗以及转子涡流损耗。以 1.6 N·m 输出转矩为满负载率对电机在不同负载率情况下的各部分损耗进行分析。

图 12 为电机的定子屏蔽套材料分别为 SUS304、SUS430 和氧化锆时, 电机铁耗随负载率变化的曲线图。由图 12 可知, 随着负载率的增加, 电机的铁耗也呈增加趋势。从空载起, 每增加 20% 负载率, 定子屏蔽套材料为 SUS304、SUS430 和氧化锆时对应的铁耗增加区间分别为 4.7% ~ 6.1%、10.9% ~ 63% 和 1.0% ~ 3.1%。采用 SUS430 时铁耗最大, 这是由于铁耗是磁场在铁心中变化产生的, 而 SUS430 具有导磁性, 加剧了磁场变化从而引起铁耗增加。定子屏蔽套材料为氧化锆的铁耗比 SUS304 的铁耗大, 这是因为与 SUS304 相比, 材料为氧化锆时电机损耗小、效率高, 耦合算

出的温度低,对永磁体参数的影响程度小,在铁心部位产生的磁密大,所以铁耗较高。

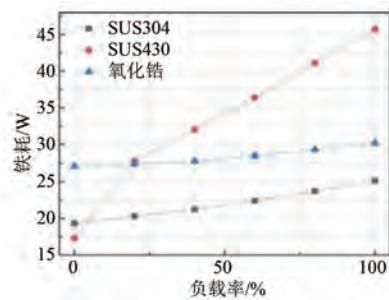


图 12 三种定子屏蔽套材料下电机铁耗随负载率变化的曲线

Fig. 12 Curves of variation of motor iron loss with the load rate under three stator can sleeve materials

屏蔽套涡流损耗是屏蔽式电机中占比比较大的损耗。交变的气隙磁场以同步转速切割屏蔽套感应涡流,产生涡流磁场^[20],产生的涡流磁场与原来气隙中的磁场相互影响,导致电机的输出特性发生改变^[21],并且损耗会引起温度变化。

图 13 为三种定子屏蔽套材料下定子屏蔽套涡流损耗随负载率变化的曲线。由图 13 可知,随负载率增加,定子屏蔽套涡流损耗增加很小。从空载起,每增加 20% 负载率,三种定子屏蔽套材料下损耗增加区间为 0.04% ~ 0.8%,并且材料为 SUS430 时的损耗高于为 SUS304 时。定子屏蔽套材料为氧化锆时,电机无定子屏蔽套涡流损耗,这是因为氧化锆不导电,在定子屏蔽套区域不会感应出涡流,因此无涡流损耗。采用氧化锆作为定子屏蔽套材料可以很好地抑制涡流损耗。

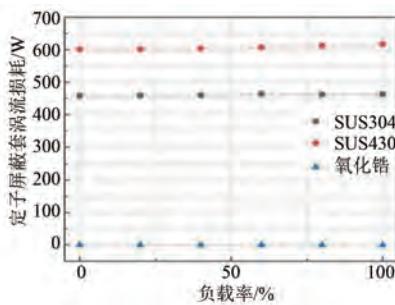


图 13 三种定子屏蔽套材料下电机定子屏蔽套涡流损耗随负载率变化的曲线

Fig. 13 Curves of the variation of eddy current loss of motor stator can sleeve with the load rate under three stator can sleeve materials

图 14 为三种定子屏蔽套材料下铜耗随负载

率变化的曲线。由图 14 可知,随着负载率的增加,电机铜耗也呈增加趋势。从空载起,每增加 20% 负载率,定子屏蔽套材料为 SUS304、SUS430 和氧化锆时铜耗增加区间为 38.3% ~ 127.5%、36.9% ~ 76% 和 56% ~ 126.7%。铜耗的计算式如式(6)所示:

$$P_{\text{Cu}} = 3I^2R \quad (6)$$

式中: P_{Cu} 为铜耗; I 为电流; R 为绕组电阻。

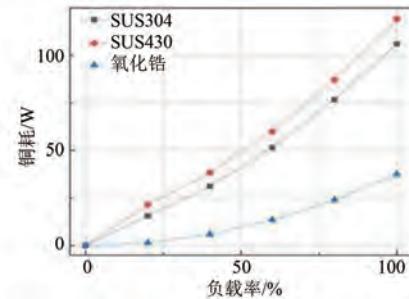


图 14 三种定子屏蔽套材料下电机铜耗随负载率变化

Fig. 14 Curves of the variation of copper loss of motor stator can sleeve with the load rate under three stator can sleeve materials

由式(3)可知温度升高会使绕组阻值增大,由式(6)可知铜耗与绕组阻值成正比,因此温度升高,绕组阻值增大,从而导致铜耗增加。当定子屏蔽套材料为氧化锆时温升比另外两种材料低、绕组阻值小、铜耗小,满载情况下铜耗较采用 SUS304 降低 64%,较采用 SUS430 降低 68%。

图 15 为三种定子屏蔽套材料下电机转子涡流损耗随负载率变化的曲线图。由图 15 可知,定子屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS430 时转子涡流损耗的增加趋势高于材料为氧化锆时。从空载

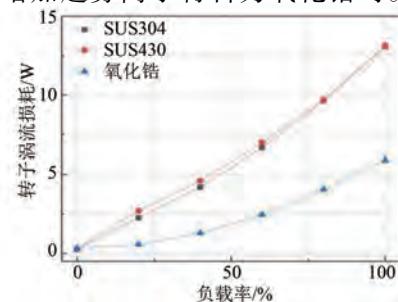


图 15 三种定子屏蔽套材料下电机转子涡流损耗随负载率变化的曲线

Fig. 15 Curves of the variation of motor rotor eddy current loss with the load rate under three stator can sleeve materials

起,每增加 20% 负载率,定子屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS430 时转子涡流损耗增加区间为 33%~108.8%,材料为氧化锆时转子涡流损耗增加区间为 35.8%~147%。

图 16 为三种定子屏蔽套材料下电机效率随负载率变化的曲线。由图 16 可知,随负载率的增加电机效率呈增加趋势,当定子屏蔽套材料为氧化锆时,电机效率高于采用 SUS304 和 SUS430 时的效率。这是因为采用氧化锆时,电机无定子屏蔽套涡流损耗,损耗大幅减少,因此提高了电机效率。

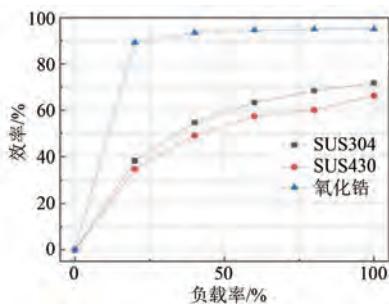


图 16 三种定子屏蔽套材料下电机效率随负载率变化的曲线

Fig. 16 Curves of the variation of motor efficiency with the load rate under three stator can sleeve materials

图 17 为三种定子屏蔽套材料下功率因数随负载率变化的曲线。由图 17 可知,从 20% 负载率起,三种材料的功率因数随负载率的增加均呈下降趋势,且每增加 20% 负载率,定子屏蔽套材料为 SUS304、SUS430 和氧化锆时对应的功率因数下降区间分别为 1.5%~2.3%、3.8%~6.1% 和 0.2%~1.1%。

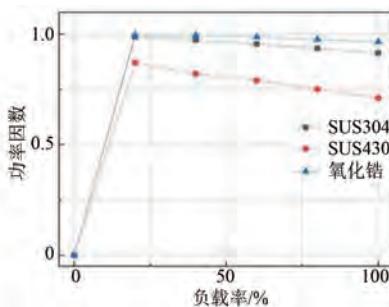


图 17 三种定子屏蔽套材料下功率因数随负载率变化的曲线

Fig. 17 Curves of the variation of the power factor with the load rate under three stator can sleeve materials

根据电磁场计算得到电机的损耗,可在温度

场计算得到电机的各部分温度,并且温度场计算出的温度反过来还会对电磁场产生影响。因此,对电机温度场的分析尤为必要。

3 屏蔽套材料对电机温度场的影响

传热从物理本质上区分通常有三种基本形式,即热传导、对流换热及辐射换热^[22]。定子和转子内部各部件间是热传导,机壳表面为对流换热,辐射换热影响很小可忽略不计。在有限元软件 Ansys Workbench 中设置边界条件,电机整体采用等效模型。输入损耗数据采用满负载率下(即输出转矩为 1.6 N·m)的损耗数据。电机散热方式为水冷,在机壳内设置螺旋型水道,设壁面光滑,入口边界条件采用速度入口,入口流速为 2.5 m/s,出口边界条件采用压力出口,出口压力为 1 个标准大气压。图 18 为屏蔽电机温度场三维模型。



图 18 温度场三维模型

Fig. 18 Three-dimensional model of temperature field

电机内的各部分损耗作为热源按照计算值赋值到各部件中,假设每个部件中热源按照体积均匀分布。用 Ansys Workbench 稳态温度场分析三种定子屏蔽套材料下的电机温度场。图 19 为定子屏蔽套材料为 SUS304 时电机各部分温度分布情况。

从图 19(a)可知电机整体的温度分布情况,电机的热源来自于各项损耗,损耗产生的位置会产生热量,通过传热由散热部分将热量散发出去。电机整体主要热量在定子屏蔽套和定子绕组,该部位损耗产生的热量由定子绕组传到定子铁心,再由定子铁心传到机壳,从机壳内冷却水道进行散热。图 19(b)为定子屏蔽套的温度分布云图,从图 19(b)可知,定子屏蔽套的最高温度集中在与定子槽口接近的位置,最高温度达 145.56 °C。这是因为定子屏蔽套与定子铁心相接触部位的热量通过热传导由定子铁心传出一部分,而在定子

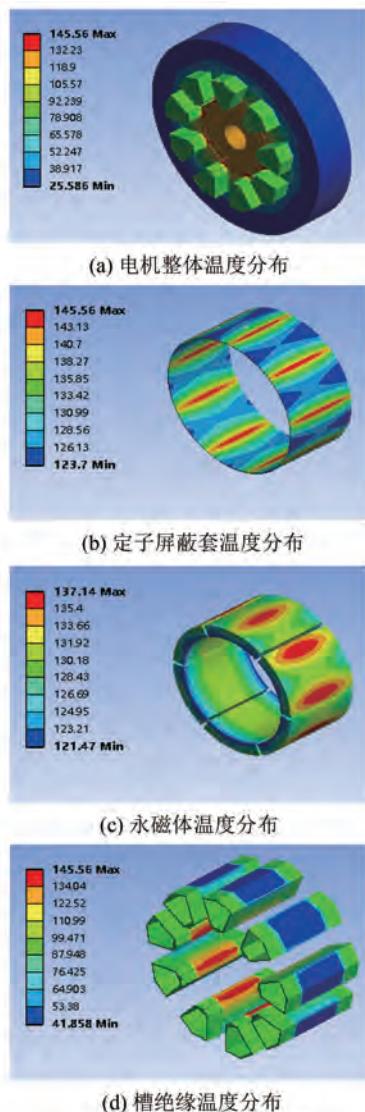


图 19 定子屏蔽套材料为 SUS304 时的电机各部分温度分布

Fig. 19 Temperature distribution of each part of the motor when the stator can material is SUS304

槽口位置处定子屏蔽套不与定子铁心相接触,不能通过热传导进行散热,所以定子槽口的温度较高。图 19(c)为永磁体的温度分布云图,可以看出,最高温度集中在中部与定子槽口较近的位置。主要因为该部位距离定子屏蔽套和定子槽口较近,温度较高。图 19(d)为槽绝缘的温度分布云图,槽绝缘的内部装有定子绕组,外部连接定子铁心。由图 19(d)可知,轴向的温度分布趋势为中间部位温度低于两端温度,这是由于中间部位与定子铁心接触充分、散热较好,热量主要沿径向传递,沿轴向传递的热量很少,故两端部温度较高。

并且绝缘靠近定子槽口的一端温度高于绕组靠近槽底的一端,这是因为靠近定子铁心齿部的绕组散热条件较靠近定子铁心轭部的差,所以靠近定子铁心齿部的绕组温升较高^[23]。

图 20 为定子屏蔽套材料为 SUS430 时电机各部分温度分布云图。由图 20(a)可以看到电机整体最高温度达 180.47 °C。各部分温度分布特点与定子屏蔽套材料为 SUS304 时相同。由图 20(a)和图 20(b)可知,最高温度也是集中在定子屏蔽套与定子槽口对应位置。表 2 为三种不同定子屏蔽套材料下电机各部分的最高温度,由表 2 可

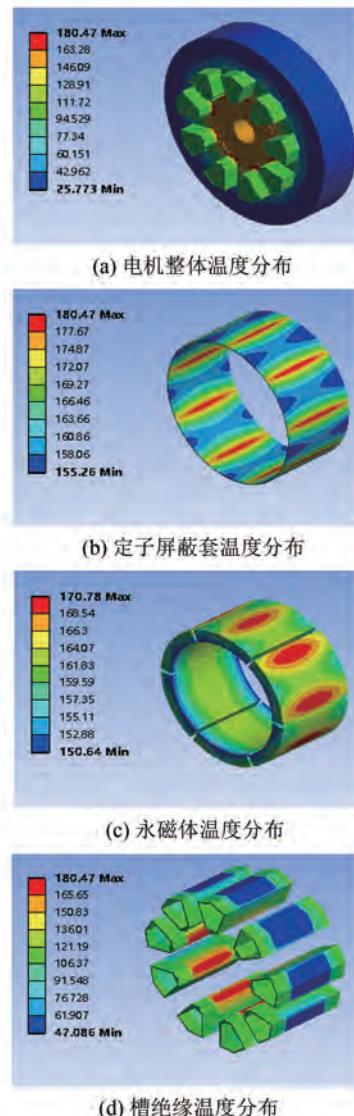


图 20 定子屏蔽套材料为 SUS430 时的电机各部分温度分布

Fig. 20 Temperature distribution of each part of the motor when the stator can material is SUS430

知,材料为SUS430时电机的各部分温度均最高,材料为氧化锆时电机的各部分温度均最低。

表 2 三种不同定子屏蔽套材料下电机各部分的最高温度

Tab. 2 Maximum temperature of each part of the motor under three different stator can materials

定子屏蔽套材料	定子屏蔽套温度	永磁体温度	槽绝缘温度
SUS304	145.56	137.14	145.56
SUS430	180.47	170.78	180.47
氧化锆	32.18	32.42	33.30

图 21 为是定子屏蔽套材料为氧化锆时电机

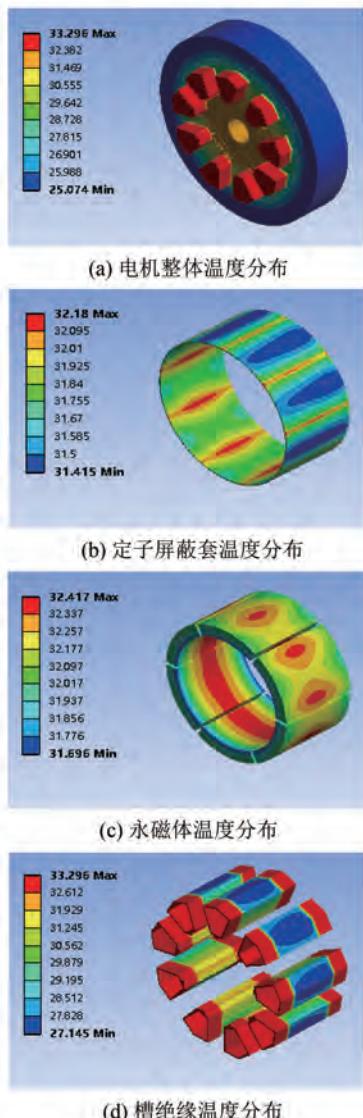


图 21 定子屏蔽套材料为氧化锆时的电机各部分温度分布

Fig. 21 Temperature distribution of each part of the motor when the stator can material is zirconia

各部分温度分布云图。由图 21(a)可知,采用氧化锆时电机的整体温度分布特点与采用 SUS304、SUS430 时相同,不同的是温度最高处在定子绕组端部槽绝缘。这是因为定子屏蔽套材料为氧化锆时电机没有屏蔽套涡流损耗。由于绕组中间部分热量可通过铁心传递出去,所以温度较两端伸出部分更低。定子屏蔽套材料为氧化锆时电机整体的温升是三种材料中最低的,最高温度为 33.30 ℃。

4 结语

本文以 1 台 1.5 kW 的屏蔽式永磁同步电机为例,采用磁热双向耦合分析了屏蔽套材料对电机性能的影响,并与单向耦合计算的磁场进行比较。建立了电机三维模型,利用有限元软件进行了电磁场分析和三维温度场分析,得出如下结论:

(1) 屏蔽式永磁电机在定子屏蔽套材料为 SUS304、SUS430 和氧化锆时,通过双向耦合法得到的气隙磁密基波幅值比单向耦合法分别降低 12.2%、14.8% 和 0.8%,空载感应电动势幅值分别降低 12.6%、16% 和 0.9%。定子屏蔽套材料为氧化锆时,采用双向耦合法得到的气隙磁密基波幅值比材料为 SUS304 和 SUS430 时分别增加 13% 和 8%,空载感应电动势幅值分别增加 13.7% 和 11%。

(2) 分析了三种不同定子屏蔽套材料下电机的各部分损耗、效率及功率因数。定子屏蔽套材料为氧化锆时,电机无定子屏蔽套涡流损耗,总损耗最小,效率最高。

(3) 对电机进行稳态温度场仿真,当定子屏蔽套材料为 SUS430 时电机整体的温升最高,为氧化锆时电机整体的温升最低。定子屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS430 时最高温度位于定子屏蔽套处,材料为氧化锆时最高温度在定子绕组端部槽绝缘处。

参 考 文 献

- [1] 邓文字,齐丽君,王光玉,等.中国高端真空泵驱动电机及控制技术的现状和发展[J].电机与控制应用,2020,47(7):1-8.
DENG W Y, QI L J, WANG G Y, et al. Present situation and development of drive motor and control technology for high-end vacuum pump in China [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47 (7): 1-8.

- [2] 毕晓舜, 安跃军, 杨维国, 等. 真空干泵用屏蔽电机温度场仿真分析与试验 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 64-69.
BI X S, AN Y J, YANG W G, et al. Simulation and experiment of temperature field of canned motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(5): 64-69.
- [3] 张保全. 真空干燥技术及真空泵的应用技术探讨 [J]. 内燃机与配件, 2019, 13: 264-265.
ZHANG B Q. Discussion on vacuum drying technology and application technology of vacuum pump [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019, 13: 264-265.
- [4] 张文校, 胡岩, 曹力, 等. 高速永磁屏蔽电机摩擦损耗分析与计算 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3122-3129.
ZHANG W X, HU Y, CAO L, et al. Analysis and calculation of friction loss of high-speed permanent magnet shielded motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (12): 3122-3129.
- [5] 牛群. 基于热网络法的永磁屏蔽电机温升研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
NIU Q. Research on temperature rise of permanent magnet canned motor based on thermal network method [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2023.
- [6] LI M, LUN S X, YIN H, et al. Influence of laminated stainless steel composite can sleeve on electromagnetic field and performance of canned induction motor [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2023, 71 (3): 273-285.
- [7] GAO L L, LIU H, NIU Q. Analytical model for no-load magnetic field, can losses, and temperature of permanent magnet canned motor [J]. IEEE Access, 2023, 11: 74816-74827.
- [8] YU Q, CHU S, LI W T, et al. Electromagnetic shielding analysis of a canned permanent magnet motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10): 8123-8130.
- [9] QIU H, LIU Z Y, XIONG B, et al. Influence of sleeve material and sleeve composite structure on performance of high-speed permanent magnet starter-generator for micro-gas turbine [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 17: 2275-2284.
- [10] 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.
- [11] LI W L, LI L, LI J Y, et al. Influence of sleeve material on electromagnetic field based on multi-physical field for permanent magnet synchronous motor [C] // IEEE International Magnetics Conference, Singapore, 2018.
- [12] 韩雪岩, 李春雷, 宋聪, 等. 基于磁热耦合法的高速永磁电机温升计算及其应用 [J]. 微电机, 2020, 53(1): 13-19.
HAN X Y, LI C L, SONG C, et al. Temperature rise calculation of high speed permanent magnet motor based on magneto-thermal coupling method and its application [J]. Micromotors, 2020, 53 (1): 13-19.
- [13] 张培一, 安辉, 胡玉勇, 等. 真空干泵用磁通切换永磁同步电机温度场仿真分析 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 59-65.
ZHANG P Y, AN H, HU Y Y, et al. Temperature field simulation analysis of flux-switching permanent magnet synchronous motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50 (6): 59-65.
- [14] 韩雪秋, 安跃军, 安辉, 等. 真空干泵驱动电机冷却效果分析 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 69-76.
HAN X Q, AN Y J, AN H, et al. Analysis of cooling effect of drive motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48 (6): 69-76.
- [15] 李广阔, 冯桂宏, 张炳义. 基于磁热耦合法的提花喷气织机直驱永磁电机设计 [J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 88-95.
LI G K, FENG G H, ZHANG B Y. Design of jacquard air jet loom direct-drive permanent magnet motor based on magneto-thermal coupling method [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(1): 88-95.
- [16] 孙若兰, 彭辉灯, 杨都, 等. 基于磁热双向耦合的永磁电机损耗和温升分析 [J]. 微电机, 2022, 55

- (5) : 23-29+39.
- SUN R L, PENG H D, YANG D, et al. Analysis and research on loss and temperature rise of PMSMs using electromagnetic-thermal bi-directional coupling [J]. *Micromotors*, 2022, 55(5) : 23-29+39.
- [17] LI M, AN Y J, ZHANG Z H, et al. Effect of time harmonic current considering load condition on performance of canned induction motor [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2021, 66(3) : 369-385.
- [18] 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.
- [19] 韩雪岩, 宋聪. 基于磁热耦合法车用永磁同步电机温升计算及影响因素的研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(2) : 28-35.
- HAN X Y, SONG C. Research on temperature rise influencing factors and calculation of permanent magnet synchronous motor for vehicle based on magneto-thermal coupling method [J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(2) : 28-35.
- [20] 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.
- [21] 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, 2021.
- CHU S. Analysis of can effect and eddy current of canned permanent magnet motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [22] 魏永田, 孟大伟, 温佳斌. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- WEI Y T, MENG D W, WEN J B. Internal Heat Exchange of Motor [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [23] 王小飞, 代颖, 罗建. 基于流固耦合的车用永磁同步电机水道设计与温度场分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊1) : 22-29.
- WANG X F, DAI Y, LUO J. Waterway design and temperature field analysis of vehicle permanent magnet synchronous motor based on fluid-solid coupling [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(S1) : 22-29.

收稿日期:2023-12-08

收到修改稿日期:2024-01-03

作者简介:

于添昊(1999-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机多物理场研究,2022008044@qymail.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@qymail.bhu.edu.cn。

Study on the Influence of Can Sleeve Material on the Electromagnetic Field and Temperature Field of Canned Permanent Magnet Synchronous Motor

YU Tianhao, LI Ming, LUN Shuxian *

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

Key words: can sleeve material; electromagnetic field; temperature field; magneto-thermal bi-directional coupling

The vacuum pump is an essential device for obtaining a vacuum, and the electric motor configured in the vacuum pump is a canned motor. Due to the advantages of canned permanent magnet synchronous motor, such as low loss, small size, safety and reliability, their applications are becoming increasingly widespread. The study of the electromagnetic field and temperature field of canned permanent magnet synchronous motor is also getting more important.

Based on the magneto-thermal bi-directional coupling method, the impact of different can sleeve materials on the electromagnetic characteristics and temperature distribution of canned motors is analyzed. From previous research, it is known that the bi-directional coupling method can obtain the results closer to reality than the unidirectional coupling method, so the bi-directional coupling method is proposed. Firstly, the calculation process of the magneto-thermal bi-directional coupling method is introduced, and the model of the canned motor used for analysis is presented. And in this paper, finite element software is used for electromagnetic field and temperature field analysis. The two-dimensional model of the canned motor is shown as Fig.1 and the three-dimensional model of temperature field is shown as Fig.2.

Secondly, a 1.5 kW, 9 000 r/min canned permanent magnet motor is taken as an example, based on the directional coupling without considering the temperature's impact on the winding and permanent magnet, and bi-directional coupling

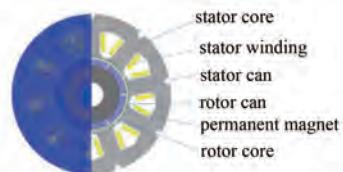


Fig. 1 Two-dimensional model of the canned motor



Fig. 2 Three-dimensionl model of temperature field

considering the temperature's impact on the winding and permanent magnet, the air gap magnetic density and induced electromotive force of the motor are comparatively analyzed when the stator can sleeve materials are SUS304, SUS430, and zirconia respectively. Besides, the analysis includes iron losses, copper losses, stator can sleeve eddy current losses, rotor eddy current losses, efficiency, and power factor of the motor under different load rates.

Finally, the simulation results show that the temperature is the highest when using SUS430 material as the stator can sleeve, and the temperature is the lowest when using zirconia as the stator can sleeve. This research not only provides a reference for the design of permanent magnet canned synchronous motors, but also has significant implications for ensuring the efficient and reliable operation of the motor.