

永磁同步电机油冷散热仿真与分析

李亚朋^{1*}, 秦文瑾¹, 谢梦楠¹, 蒋大千², 王克兆², 孙卫东²

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²汽车联合电子有限公司, 上海

收稿日期: 2024年10月26日; 录用日期: 2024年11月22日; 发布日期: 2024年11月29日

摘要

永磁同步电机用于高功率密度、高工作频率的车辆, 不可避免地会导致电机本身温度升高, 避免过高的温度对于电机的稳定运行至关重要。本文对一台8极48槽油冷式永磁同步电机进行建模, 使用光滑粒子流体动力学方法(SPH)对冷却油的运动状态以及电机各表面的散热系数进行仿真计算。在此基础上, 结合有限元方法对电机温度场进行数值计算, 通过将电机在油冷冷却方式下与自然冷却方式下的温度场进行对比, 证明油冷冷却方式的高效性, 随后加入空心轴冷却结构以解决端部绕组温度较高问题, 对电机的冷却系统设计提供参考, 确保电机在高温环境下安全运行。

关键词

永磁同步电机, 换热系数, 流体力学, 有限元仿真, 温度场

Simulation and Analysis of Oil Cooling and Heat Dissipation in Permanent Magnet Synchronous Motors

Yapeng Li^{1*}, Wenjin Qin¹, Mengnan Xie¹, Daqian Jiang², Kezhao Wang², Weidong Sun²

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²United Automotive Electronic Systems Co., Ltd., Shanghai

Received: Oct. 26th, 2024; accepted: Nov. 22nd, 2024; published: Nov. 29th, 2024

Abstract

Permanent magnet synchronous motor is used in vehicles with high power density and high

*通讯作者。

working frequency, which will inevitably lead to the temperature rise of the motor itself. Avoiding excessive temperature is very important for the stable operation of the motor. In this paper, an 8-pole and 48-slot oil cooled permanent magnet synchronous motor is modeled, and the motion state of cooling oil and the heat dissipation coefficient of each surface of the motor are simulated and calculated by using the smooth particle hydrodynamics (SPH). On this basis, combined with the finite element method, the temperature field of the motor is numerically calculated. By comparing the temperature field of the motor under oil cooling mode with that under natural cooling mode, the efficiency of the oil cooling mode is proved. Then, the hollow shaft cooling structure is added to solve the problem of high temperature of the end winding, which provides reference for the design of the motor cooling system and ensures the safe operation of the motor in high temperature environment.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor, Heat Transfer Coefficient, Fluid Dynamics, Finite Element Simulation, Temperature Field

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

汽车对高性能电机的市场需求不断增长，推动了研究转向以高扭矩/功率密度为特征的设计。由于电机需要小型化，考虑到保持电机恒定的效率，热交换面积减小，而热密度增加[1]，这使得电机内部的温度随之升高，因此需要更好的冷却性能。为了提高机器的功率密度，同时保护绕组、永磁体等易损部件免受过热，以便他们能够在设计使用寿命内运行，良好的散热策略应包括减少热源、选择最佳材料和使用高性能的冷却系统。

对于高功率密度的电机，仅使用传统的冷却方法是有限的，例如，仅使用冷却夹套[2]或风冷[3]，因此需要将传统的冷却方法与复杂的间接或者直接冷却系统相结合，以便从定转子和绕组部件中提取更多的热量。在第一代电动汽车电机中，已经提出了一种间接液体冷却方法对电机进行冷却，即外壳水套冷却[4]。然而，目前电动汽车电机的需求指标主要集中在高功率密度、高效率和轻量化上[5]，因此，仅使用外壳液体护套冷却是不可能实现的。因为它增加了电机直径和外壳尺寸，导致电机的体积和重量增加，同时由于热路径较长，这种冷却方法不能有效地冷却端部绕组和转子。因此，对于下一代电动汽车电机，传统的冷却方法集成到间接或直接冷却系统中，如定子槽冷却[6]、端部绕组冷却[7]和转子冷却，以充分冷却电机的发热部件。

目前电机温度场的计算方法较多，常见的包括等效热路法和有限元法[8]。等效热路法是结合传热学和电路理论建立等效热路模型的计算方法，而实际电机的形状比较复杂，准确计算热阻和建立热路比较困难。有限元法把计算域剖分成多个单元，再把控制函数应用于各个单元进行求解，适用于复杂的几何结构和边界条件，具有较高的计算精度。

近年来，国内外学者在永磁同步电机冷却技术上有大量研究。CARRIERO 等[9]对目前应用于车辆的电机的冷却系统进行了综述，总结了散热的各种方法，最终定性的比较了各个冷却方式的优劣。Han 等[10]采用实验与数值计算相结合的方法，针对某款商用电动机，研究了电机转速对冷却性能的影响。结果表明，转子搅油现象会影响温度分布不均。Liu 等[11]采用浸入式冷却方式来降低电机温升。结果表明，与传统槽道冷却相比，在冷却流量相同时，浸入式冷却效果更好。陈辉等[12]为了研究不同流道结构对冷

却性能的影响,设计了三种油道结构。结果表明,螺旋式流道的散热效果最好。刘显茜等[13]设计了一种机壳串并联混合流道,结果表明,机壳串并联混合流道相对串联流道电机有更高效的散热性能。

本文以一台车用油冷式永磁同步电机为研究对象,通过在定子内部布置油道来实现对电机端部和中心位置的冷却。借助光滑粒子流体动力学方法对冷却油的运动状态以及电机各表面的散热系数进行计算,结合有限元法和公式法计算出电机损耗,并对电机工作过程中的温度场进行仿真计算,得到电机内部温升变化,并基于仿真结果将电机在油冷冷却方式下与自然冷却方式下的温度场进行对比,证明油冷冷却方式的高效性,随后加入空心轴冷却结构以解决端部绕组温度较高问题,为电机的冷却系统设计提供参考。

2. 模型建立

2.1. 实验介绍

本文采用的实验数据由联合汽车电子有限公司提供,该数据通过基于性能测试台架进行的电机温升测试得到。台架主要由被测电机、电力测功机、传感器以及各类控制器等组成,电机台架示意图如图1所示。电机工作时,冷却油通过油泵驱动输送到电机内部,与发热部件进行热交换之后,通过电机壳体底部出油口流出。被加热的冷却油流出电机后回到油箱中,再通过油箱散热器进行冷却处理,随后再次进

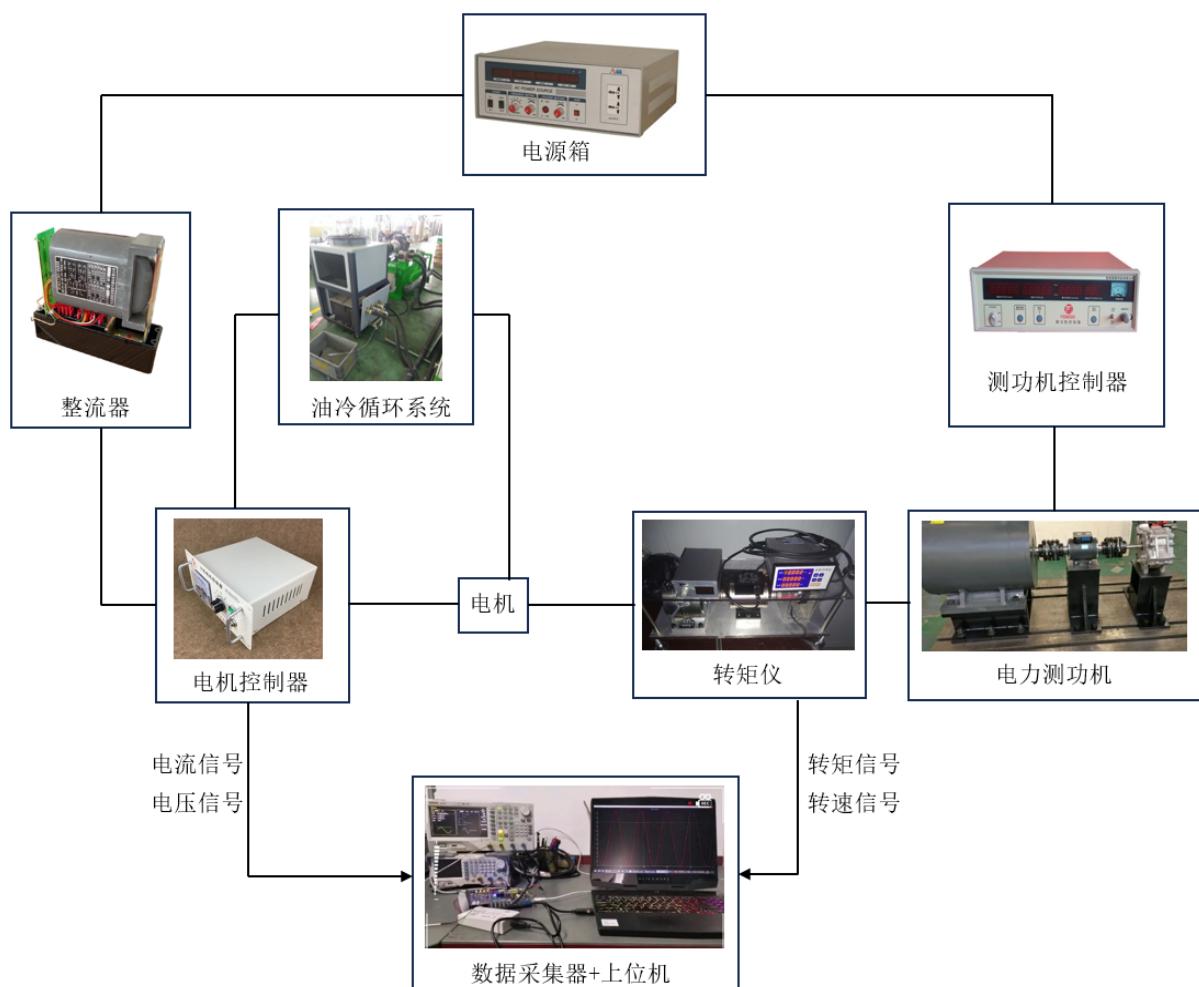


Figure 1. Diagram of temperature rise test bench

图 1. 温升测试台架示意图

入电机，以此循环。测温装置采用体积小、灵敏度高、抗干扰能力强的 NTC 温度传感器。实验电机装配测试过程中，将温度传感器预先埋设在电机内部，分别在端部绕组、定子铁芯和转子铁芯设置三个测温点，实验过程中记录相关位置的温度。

2.2. 几何模型

本文以车用油冷永磁同步电机为研究对象，根据永磁同步电机结构特点和本文研究内容，采用优化处理原则，忽略不影响电机散热的部件，最终简化后的模型如图 2 所示，包括机壳、定子铁心、定子绕组、转子铁芯、油道和转轴，表 1 为该电机的主要参数。

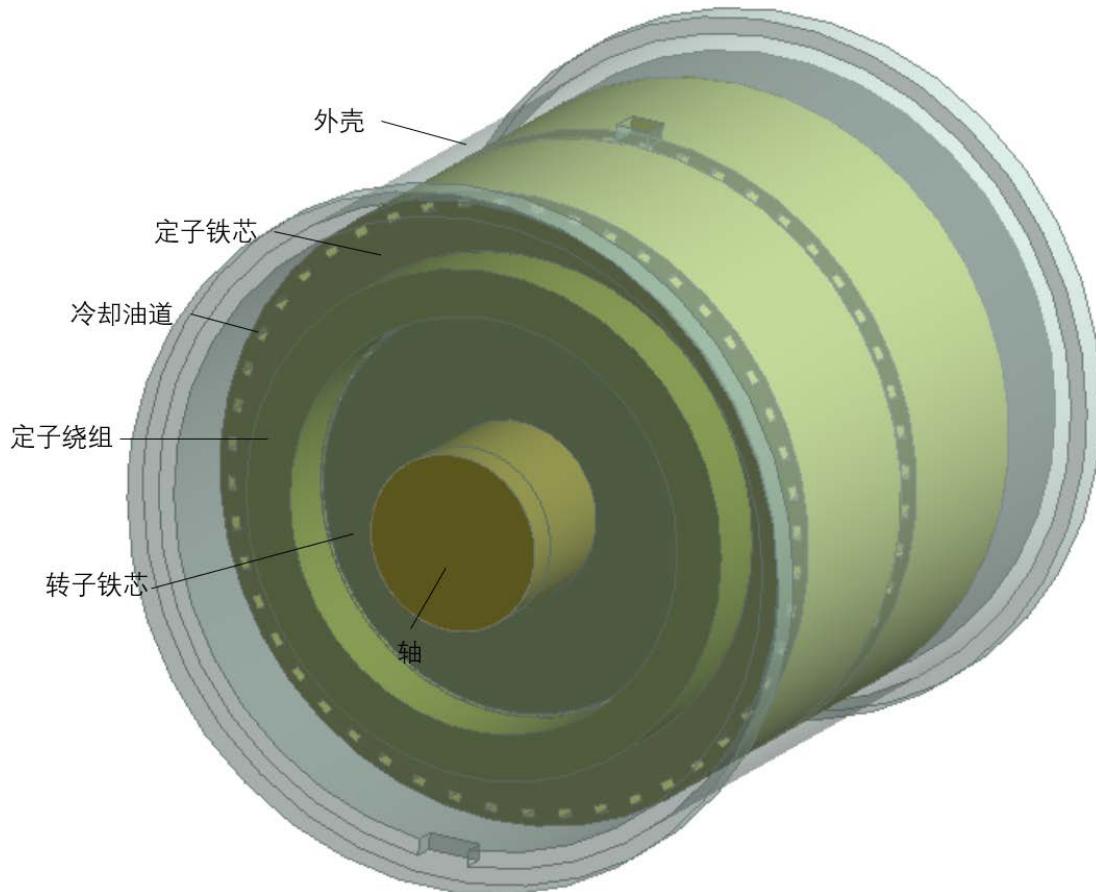


Figure 2. Diagram of motor 3D structure model
图 2. 自动化专业实践教学体系图

Table 1. Main parameters of motor
表 1. 电机主要参数

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	80	额定电压/V	330
峰值功率/kW	160	额定转速/(r/min)	6000
定子外径/mm	190	定子内径/mm	125
转子外径/mm	123	转子内径/mm	53
气隙长度/mm	1	叠压系数	0.94

2.3. 流动传热模型

本文采用光滑粒子流体动力学(SPH)和有限元(FEM)方法对电机温度场进行计算, 其中电机固体部件采用有限元网格, 冷却油采用SPH粒子来表示。有限元方法在温度场计算方面具有更高的精度, SPH方法中不需要进行网格划分, 对流体部分使用粒子形式表示[14]。

1) SPH方法

SPH方法即光滑粒子流体动力学方法, 是一种纯拉格朗日的无网格粒子计算方法, 无网格法基于点的近似。SPH方法将流体描述为多粒子之间的相互作用, 流体为由一组相互作用的粒子表示的连续体, 如图3所示, 空间内任意粒子与给定距离内的所有其他粒子j相互作用, 表示粒子支持域半径。

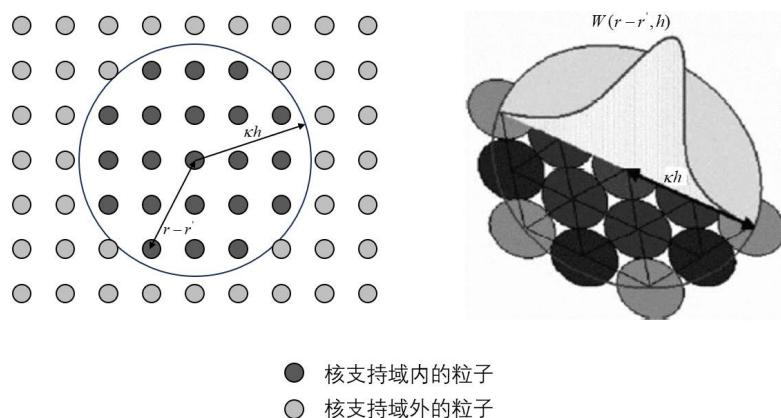


Figure 3. Diagram of particle i adjacent particle distribution and support domain
图3. 粒子 i 相邻粒子分布及支持域示意图

每个粒子所需承载流体的相关物理量(例如: 粒子速度、质量、密度和体积等)可以由以下公式表征:

$$\begin{aligned} f(r) &= \int_{\Omega} f(r') W(r-r', h) dr' \\ &\approx \sum_{j=1}^N V_j f(r_j) W(r_i - r_j, h) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(r)$ 是粒子主属性; $f(r')$ 是相邻粒子属性; $W(r-r', h)$ 是核函数; $\sum_{j=1}^N V_j f(r_j) W(r_i - r_j, h)$ 是相邻粒子的影响求和的离散化形式(下标 j 代表相邻粒子编号)。

2) 热传递形式

电机内部的热现象非常复杂, 因为同时涉及大量的热交换现象, 传热有三种基本方式: 热传导、热对流和热辐射。热传导的基本计算公式是傅里叶定律:

$$\phi_{cond} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

式中: ϕ_{cond} 是传热面 A 内通过的热量; λ 是材料的导热系数; A 是导热面积; $\partial T / \partial n$ 是物体沿 n 方向的温度变化率。

热对流的基本计算是基于牛顿冷却公式:

$$\phi_{conv} = hA(T_s - T_f) \quad (3)$$

式中: ϕ_{conv} 是热流量, 与表面温度 T_s 与流体温度 T_f 之差成正比; A 为对流换热的面积; h 是表面换热系数。

2.3. 损耗模型

电机运行过程中, 定转子铁芯、绕组和永磁体之间存在的相互作用会引起磁场变化, 从而导致能量的损失, 各种损耗最终会转换成温升。通过有限元法并结合公式对损耗进行计算, 计算得出额定工况下电机的损耗见表 2, 大部分损耗分布在绕组和定子铁芯中。

Table 2. Loss value of each motor component

表 2. 电机各部件损耗值

损耗	数值/W
定子铁耗	904
转子铁耗	431
绕组铜耗	4588
永磁体涡流损耗	58

3. 等效处理边界条件

由于部分部件结构复杂, 难以直接建立模型, 因此通常采用等效导热系数来简化结构, 便于计算。

3.1. 气隙等效处理

定转子通过气隙的对流换热也是散热的关键, 转子旋转会使气隙中的空气流动, 定子和转子之间的传热主要通过空气对流来完成, 由于定转子和气隙之间的换热过程较复杂, 通常用等效导热系数来代替气隙中空气的导热系数, 可以通过如下公式计算散热系数[15]。

$$\left. \begin{aligned} \text{Re} &= \frac{2\pi R_r n \delta}{60 \nu_a} \\ \lambda &= 0.0019 \frac{R_r}{R_s}^{-2.9084} \text{Re}^{0.4614 \ln \left(3.33361 \frac{R_r}{R_s} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: Re 为空气雷诺数; R_r 为转子外径; n 为转子转速, 单位为 r/min ; δ 为气隙长度; ν_a 为空气运动粘度; λ 为等效气隙的导热系数; R_s 为定子外径。

3.2. 定子槽内绕组等效处理

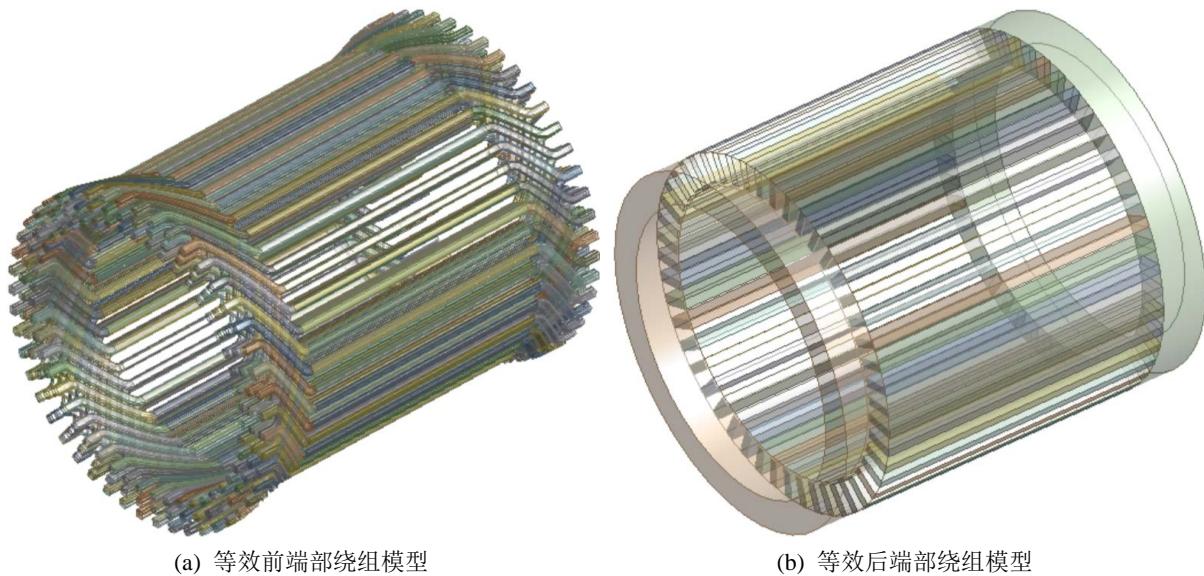
定子绕组是电机主要结构中最复杂的, 仿真过程中完全复制铜导体和绝缘材料会增加热模型的复杂性, 因此有必要对定子绕组进行简化或等效处理, 本研究中将铜导体与绝缘材料等建模为具有新热特性和均匀发热的等效均质材料。将绝缘纸和漆膜等效为绕组与定子壁的接触面, 其导热系数可按式 5 计算得到[16]。

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i}{\sum_{i=1}^N (\delta_i / \lambda_i)} \quad (5)$$

式中: λ 为接触面的等效导热系数; δ_i 为不同材料的厚度; λ_i 为不同材料的导热系数; n 为材料种类数。

3.3. 端部绕组等效处理

扁线电机端部绕组结构较复杂, 如图 4(a)所示, 不利于网格划分及后续温度场计算, 为简化求解过程, 在保证电机端部绕组体积不变的情况下, 对其进行等效处理, 等效后的端部绕组结构如图 4(b)所示。

**Figure 4.** End winding equivalent front and rear model**图 4.** 端部绕组等效前后模型

3.4. 边界条件

在温度场仿真计算开始之前, 需正确设置数值模拟的边界条件, 包括仿真基本假设、材料物性参数、体积热源添加等。

1) 仿真假设

电机实际运行状态模拟难度大, 为了在不影响精度的情况下尽量节省计算资源, 缩短求解时间, 根据电机的结构和传热的特点, 做出以下假设:

- 考虑到热传导和热对流的换热量远大于热辐射的换热量, 忽略电机内部的热辐射;
- 电机内部材料的比热和导热系数不随温度变化;
- 电机内部冷却油流速远小于声速, 不考虑密度变化, 将冷却油视为不可压缩流体;
- 假设产生的所有损耗全部转化为热量, 并假设热量均匀的加载到电机对应结构部件中。

2) 材料属性

模型中各部件的材料物性参数如表 3 所示。

Table 3. Material parameters of motor components**表 3.** 电机各部件材料参数

电机部件	材料	等效导热系数/(W/(m·K))	比热容/(J/(kg·°C))
定、转子铁芯	硅钢片	39	460
定子绕组	铜	387	385
永磁体	钕磁铁	9	430
轴	钢	51	460
壳体	铝	161	871
绝缘层	—	0.21	1000
气隙	空气	0.131	1006

表 4 为冷却油的物性参数。

Table 4. Cooling oil parameter
表 4. 冷却油参数

冷却油	参数值
动力粘度	0.012/(Pa·s)
密度	882/(kg/m ³)
比热容	2300/(J/(kg·K))
导热系数	0.19/(W/(m·K))

3) 体积热源

额定运行工况下电机各部件的损耗已由表 2 所示。在计算过程中, 将损耗全部转化为热量并等效为由电机各部件均匀产生, 因此需计算电机各部件的生热率。电机各部件的生热率如表 5 所示。

Table 5. Heat generation rate of each motor component
表 5. 电机各部件生热率

部件	损耗/W	生热率/(W/m ³)
定子	904	4.50×10^5
转子	431	2.67×10^5
绕组	4588	7.55×10^6
永磁体	58	2.27×10^5

3.5. 表面对流换热系数

油冷电机在运行过程中的散热主要通过三种方式实现的: 定子、绕组和冷却油之间的对流换热, 定子、转子和气隙之间的对流换热, 以及电机外壳与空气之间的对流换热。精确求解电机表面对流传热系数是温度场计算的前提。

1) 电机壳体的外壁, 没有强制风冷, 主要依靠自然对流进行换热, 电机壳体与空气的换热系数可通过下式计算[17]:

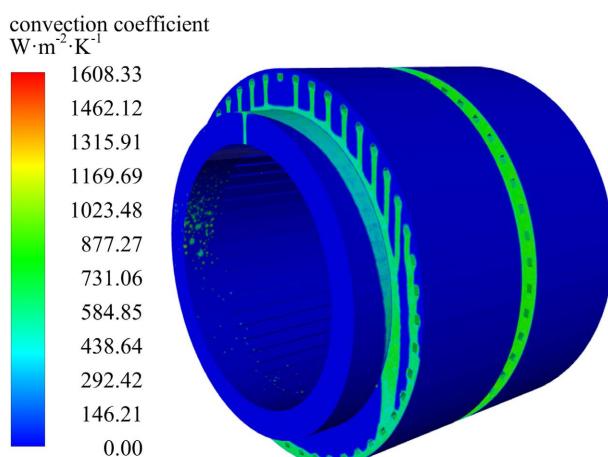


Figure 5. Stator and winding surface heat transfer coefficient under rated working conditions

图 5. 额定工况下定子和绕组表面换热系数

$$\alpha_h = 14 \left(1 + 0.5\sqrt{\omega}\right)^3 \sqrt{T_c/25} \quad (6)$$

式中: ω 为电机壳体外部的风速, 本研究中假设为 0 m/s; T_c 为壳体外环境温度。

2) 转子端面与电机内部空气之间的对流换热系数, 按经验公式计算[18]:

$$\alpha_r = 28 \left(1 + \sqrt{0.45v_r}\right) \quad (7)$$

式中: v_r 为转子端面上的线速度。

3) 定子与绕组的表面换热系数根据流体软件 Preonlab 进行计算, 边界条件设置: 边长为 10 mm 的正方形径向入口垂直放置, 与电机壳体冷却油入口对应; 冷却油初始温度为 65°C, 以 8 L/min 的流速注入; 全局液体粒子设为 0.5 mm; 同时考虑重力对冷却油在空间中流动状态的影响。

最终得到定子及绕组表面冷却油覆盖率达到稳定状态下的关于空间点坐标的表面换热系数结果如图 5 所示。

4. 温度场计算结果及分析

电机各部件不同材料的导热系数见表 3, 绕组损耗、铁芯损耗、涡流损耗分别以单位体积功率形式施加到电机不同部件上, 结合前面计算得出的关于空间点坐标的换热系数, 求解有限元模型, 最后得到油冷冷却下电机的各部件温度分布情况, 如图 6 所示。

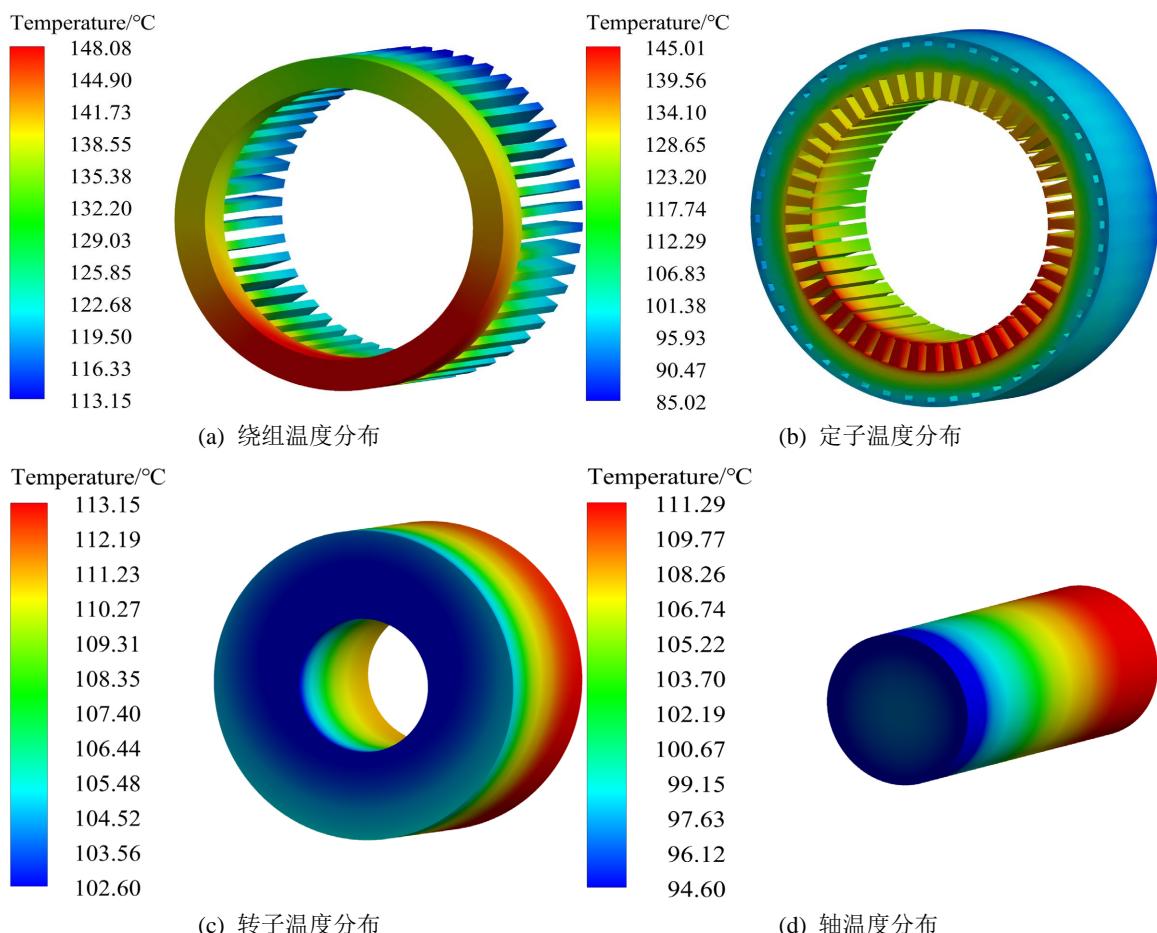


Figure 6. Temperature distribution of motor components under oil cooling

图 6. 油冷冷却下电机各部件温度分布

实验对电机在额定工况下的温度数据进行收集, 分别在定转子铁芯及绕组处设置三个测温点, 如图 7 所示, 对实验电机装配时, 在测温点处预设 NTC 温度传感器, 并对其进行检验调试, 确保信号功能正常, 即可进行电机温升实验。观察实验过程中电机的温度变化情况, 温度值达到稳定后, 电机各测温点的温度如表 6 所示。

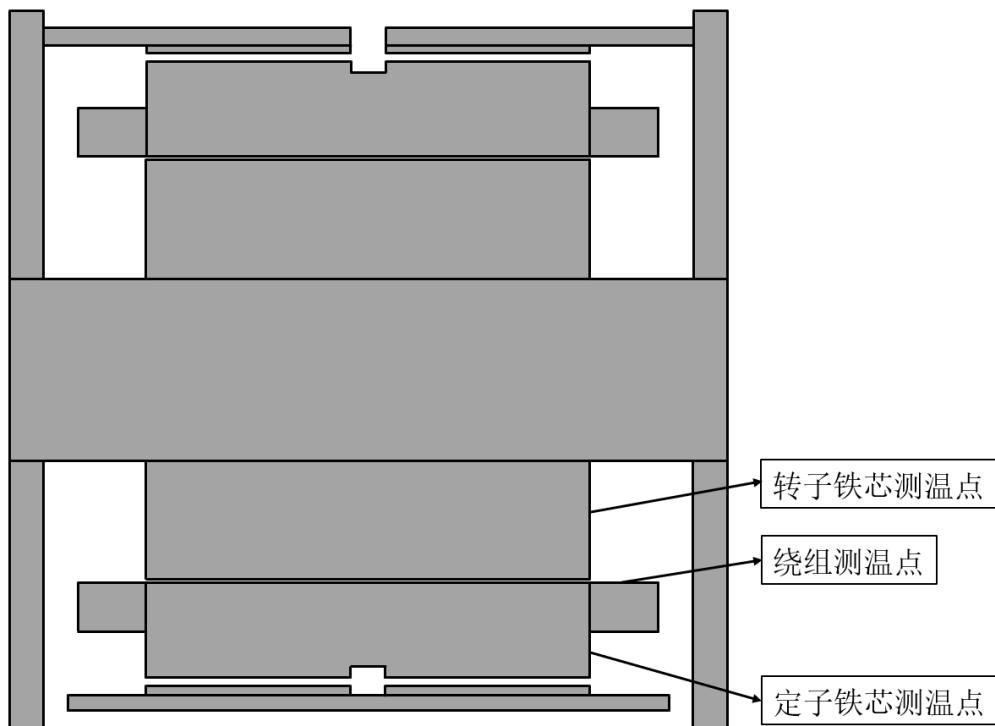


Figure 7. Diagram of temperature sensor location
图 7. 测温传感器位置示意图

Table 6. Comparison of experimental and simulation values of the motor
表 6. 电机实验值与仿真值对比

测温位置	计算结果/℃	实验结果/℃	误差/%
绕组	140.5	143.7	2.2
定子	112	115.4	2.9
转子	105.3	109.2	3.6

从表 6 可知, 电机三个测温点温度的仿真结果与实验结果间的误差均在 4% 以内, 能够满足实际工程的要求, 进一步验证了通过数值仿真计算温度场的准确性, 因此可以利用有限元法在早期设计阶段对电机的各项性能进行预测评估和优化设计, 可显著减少电机研发的经济成本, 同时提升研发效率。

随后将电机在采用自然散热及油冷冷却下的温度场进行对比, 图 8 为在额定工况下运行的永磁同步电机, 采用油冷方式前后的绕组温度场对比情况, 绕组最高温度由 192.97℃ 下降到 148.08℃, 温度下降了 44.89℃。图 9 为电机采用油冷冷却前后的定子温度场对比情况, 定子从最高温度 192.25℃ 降低到 145.01℃, 温度降低了 47.24℃。图 10 为电机采用油冷冷却前后的转子温度场对比情况, 转子从最高温度 157℃ 降低到 113.15℃, 温度降低了 43.85℃。图 11 为电机采用油冷冷却前后的轴温度场对比情况, 轴从最高温度 152.57℃ 降低到 111.29℃, 温度降低了 41.28℃。

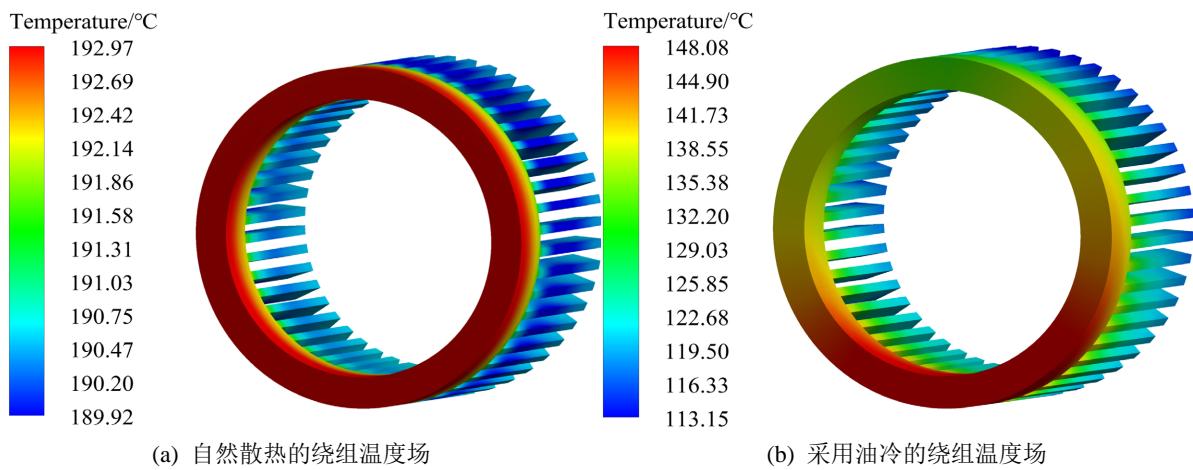


Figure 8. Windings temperature field distribution before and after oil cooling system is adopted
图 8. 采用油冷系统前后绕组温度场分布

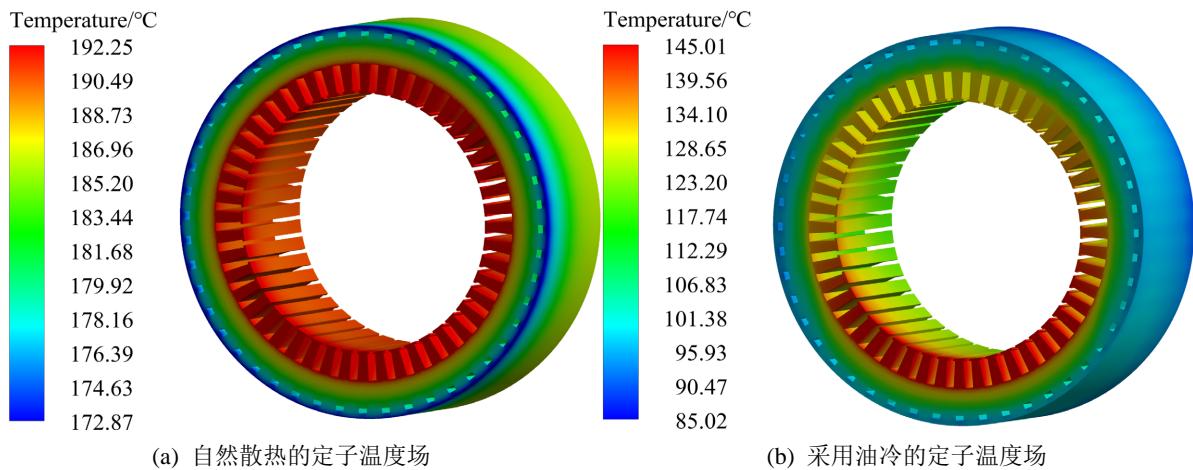


Figure 9. Stator temperature field distribution before and after oil cooling system is adopted
图 9. 采用油冷系统前后定子温度场分布

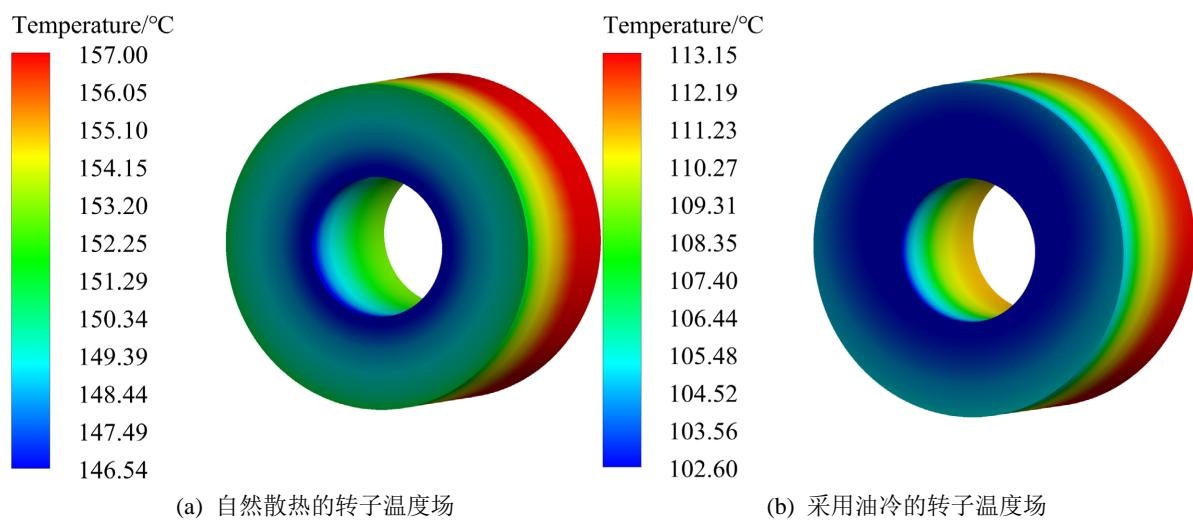


Figure 10. Rotor temperature field distribution before and after the oil cooling system is adopted
图 10. 采用油冷系统前后转子温度场分布

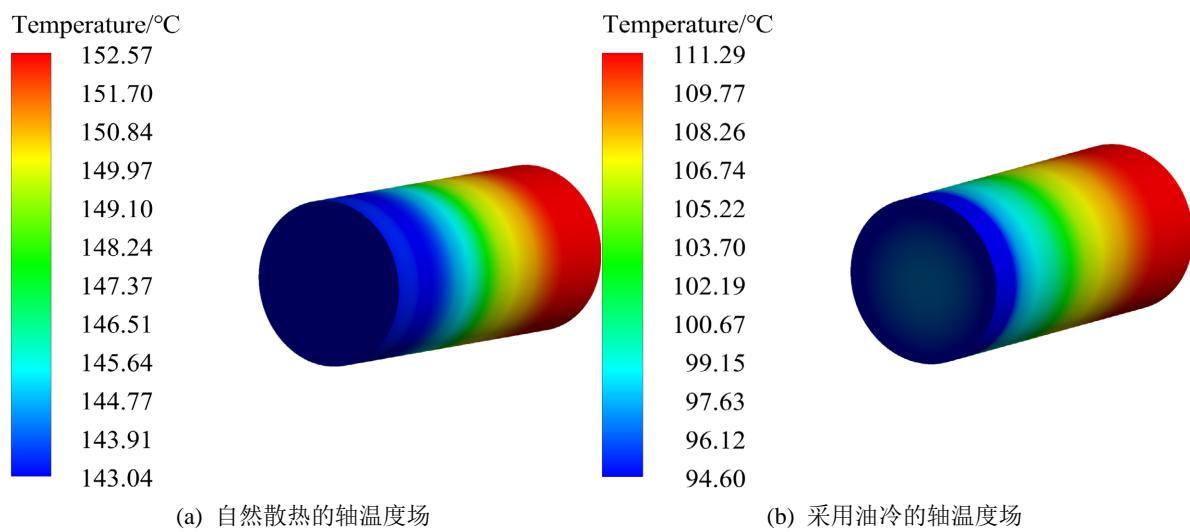


Figure 11. Axe temperature field distribution before and after the oil cooling system is adopted

图 11. 采用油冷系统前后轴温度场分布

由图得出,油冷散热条件下与自然散热方式对比,电机内部整体温度分布趋势不变,整体温度相比均减小。造成两种散热方式温差的原因主要是因为当冷却油作为导热介质时,其导热系数 $0.19 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 比空气的导热系数 $0.023 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的导热性能更好,同样冷却油与电机各部件间的对流换热系数也远大于空气与各部件的对流换热系数,换热能力也越强。因此在油冷散热方式下,电机整体温度明显降低,各部件温度均得到大幅降低,有利于电机散热。

5. 电机冷却油道结构改进

5.1. 改进参数确定

针对电机端部绕组温度较高现象,对电机冷却油道结构进行改进,在采用定子油道散热的基础上,充分利用冷却油的物理特性,建立了空心轴冷却方案,即原本的实心轴改为空心轴,并在转轴上对应端部绕组的部位开孔,如图 12 所示,冷却油从左侧到空心轴后,通过转轴离心力将冷却油喷洒至端部绕组,

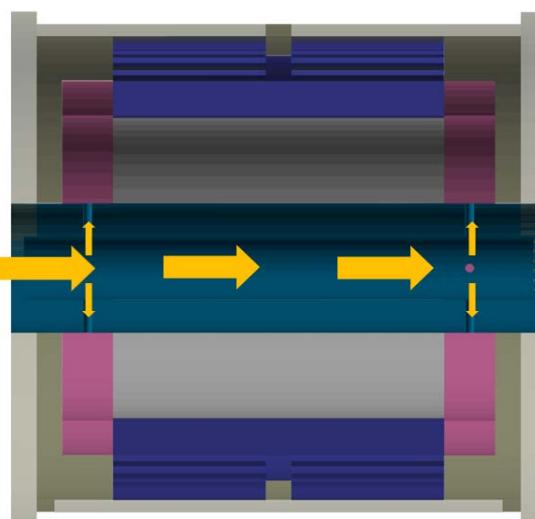


Figure 12. Improved cross-section of the motor structure
图 12. 改进后的电机结构截面图

从而达到进一步冷却端部绕组的效果，增大与冷却油的接触面积，缩短电机内部热量传递的路径，从而带走电机更多热量，同时采用空心轴结构会减轻重量节省材料。

采用空心轴后，轴同时应当满足强度要求，查阅相关资料[19]，得到按照扭转强度计算空心轴直径公式，估算空心轴内径 d_1 ：

$$d = 17.2 \left(\frac{T}{\tau_p} \right)^{\frac{1}{3}} \times \frac{1}{\sqrt[3]{1-\alpha^4}} \\ = A \left(\frac{P}{n} \right)^{\frac{1}{3}} \times \frac{1}{\sqrt[3]{1-\alpha^4}} \quad (8)$$

式中： d 为轴端直径； T 为轴所传递的转矩， $T = 9550P/n$ ； P 为轴所传递的功率； n 为轴的工作转速； τ_p 为许用扭转应力； α 为空心轴内径 d_1 与外径 d 之比； A 为常数，与轴材料有关。

同时需确定甩油孔的孔径及孔数，本文分别对孔数为 2 时孔径为 2.5 mm、3 mm、3.5 mm；孔数为 4 时孔径为 2.5 mm、3 mm、3.5 mm；孔数为 6 时孔径为 2.5 mm、3 mm、3.5 mm 的九种方案验证对比。采用空心轴的目的是为了进一步冷却绕组端部，所以对九种方案下绕组表面油液覆盖率情况进行对比，相同情况下绕组表面油液覆盖率越多则绕组表面的换热面积越大，温升相对较低。表 7 为不同冷却结构下绕组表面油液覆盖率结果。

Table 7. Surface oil coverage of winding under different cooling structures
表 7. 不同冷却结构下绕组表面油液覆盖率

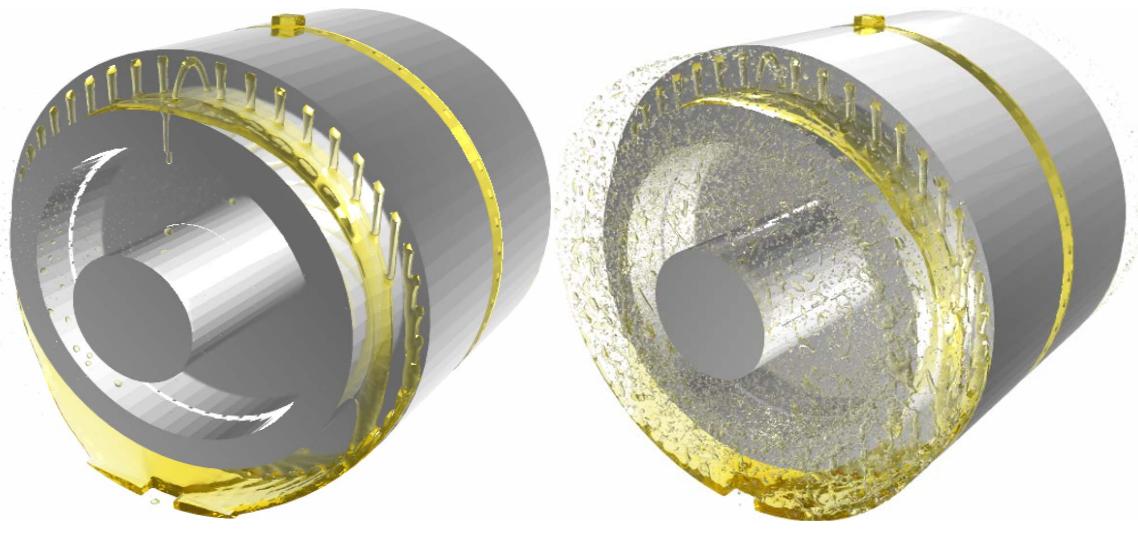
序号	孔数	孔径	绕组表面油液覆盖率结果/%
1	2	2.5	22.05
2	2	3	22.53
3	2	3.5	22.72
4	4	2.5	23.25
5	4	3	23.49
6	4	3.5	23.62
7	6	2.5	23.30
8	6	3	23.52
9	6	3.5	23.25

根据上表分析可得，不同孔数及不同孔径下的绕组表面油液覆盖率差别并不明显，孔数为 2 结构下绕组表面油液覆盖率略低于孔数为 4 及孔数为 6 结构下的绕组表面油液覆盖率，且孔数越多，制造工艺越复杂，根据以上分析结果本文空心轴油孔选取孔数为 4，孔径为 3.5 mm 的结构。

5.2. 改进后温度场仿真结果分析

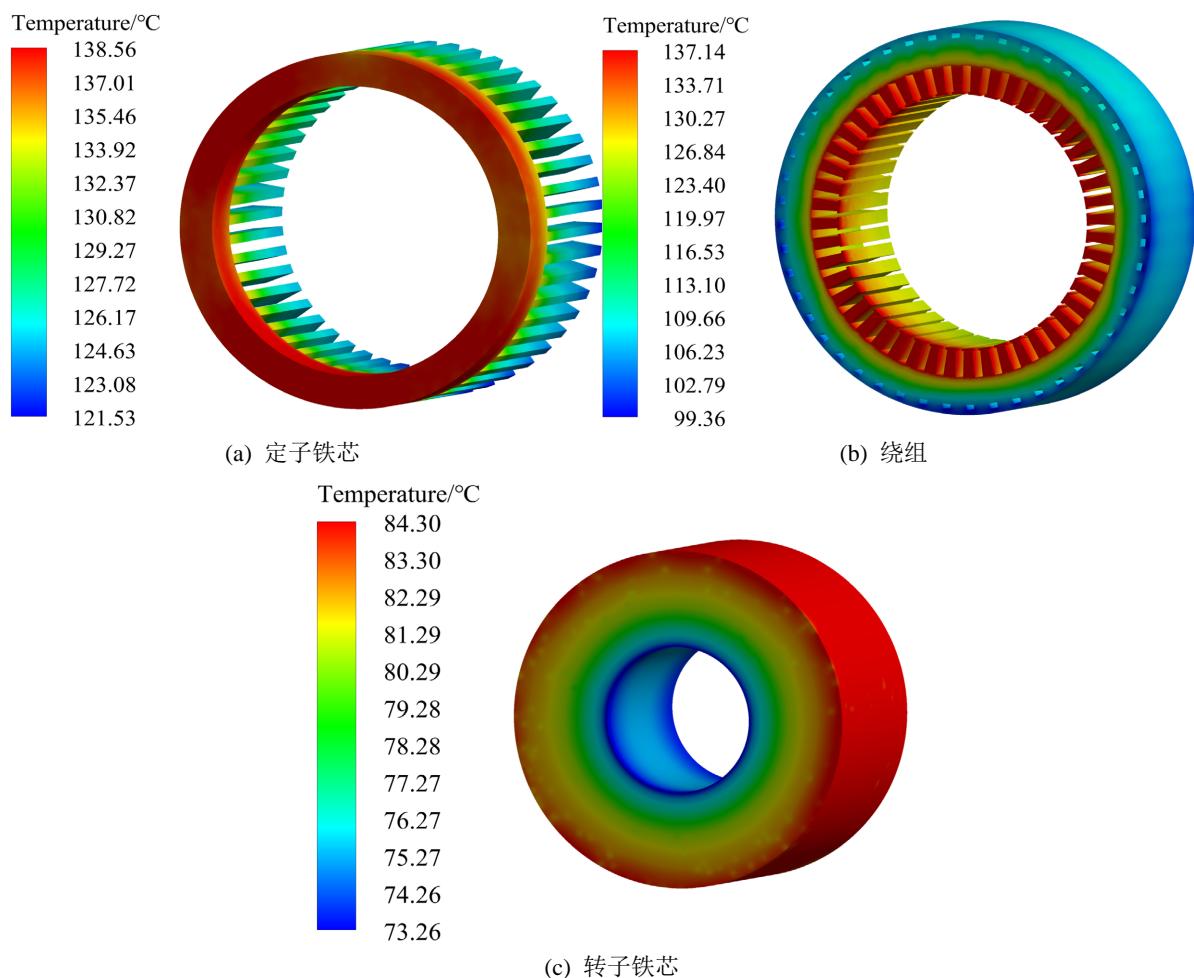
将改进前后电机内部冷却油分布情况进行对比发现，添加空心轴结构后电机端腔内的冷却油量明显增多，如图 13 所示，且端部绕组与冷却油的接触面积增大，冷却油有效喷淋到端部绕组达到比原有冷却结构进一步的冷却效果。

进一步对油冷结构改进后的电机温度场进行计算，结果如图 14 所示，图 15 为结构改进前后电机主要部件温度场结果对比。油冷结构改进前后的绕组温度场对比，绕组的最高温度由 148.08℃ 降到 138.56℃，



(a) 油冷结构改进前电机内部冷却油分布

(b) 油冷结构改进后电机内部冷却油分布

Figure 13. Oil distribution inside the motor before and after oil cooling structure improvement**图 13.** 油冷结构改进前后电机内部冷却油分布**Figure 14.** Temperature distribution of key motor components after improvement**图 14.** 改进后电机关键部件温度分布

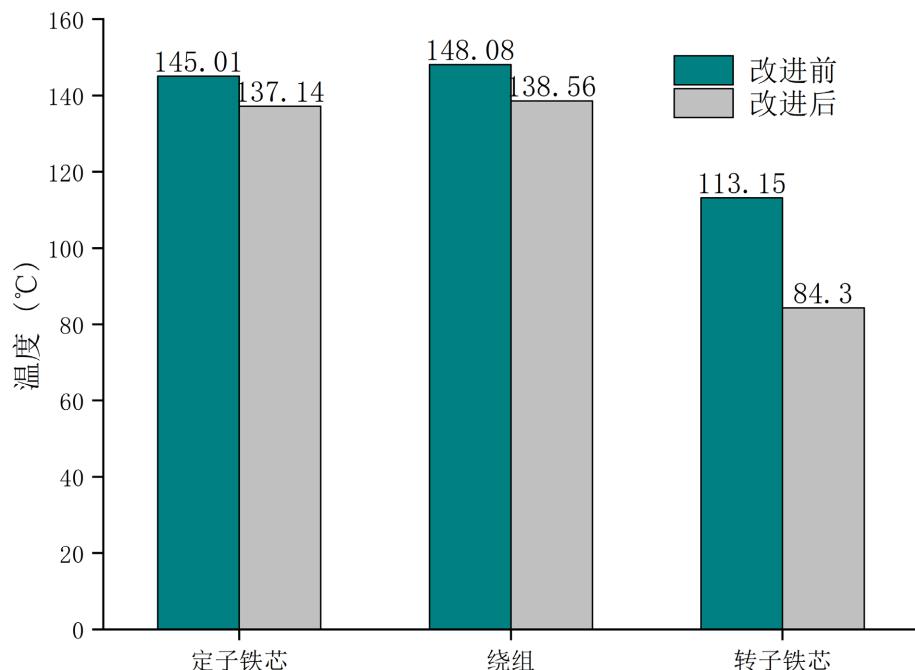


Figure 15. Temperature of key motor components before and after improvement
图 15. 改进前后电机关键部件温度

下降了 9.52°C，定子最高温度由 145.01°C 下降到 137.14°C，温度下降了 7.87°C，转子部分最高温度由 113.15°C 下降到 84.3°C，下降了 28.85°C。由图可知，油冷结构改进后各部件温度均有明显的降低，其中转子部分温度下降较为明显，主要是由于转轴结构由原本的实心轴改为空心轴，空心轴内存在较多冷却油进行散热，转子结构通过与转轴之间的热传导增强，即散热效果增强导致温度下降较为明显。

针对以上对比分析发现油冷结构改进后电机各部件温度均明显降低，因此证明冷却结构改进的必要性。

6. 结论

本文以一台油冷式永磁同步电机为例，分析计算了电机在额定工况下的损耗，并对电机在自然散热条件下与油冷冷却方式下进行了温度场仿真计算分析，得出以下结论：

- 1) 采用油冷冷却方式对电机进行冷却，油冷系统带走了电机大量的热量，电机最高温升出现在绕组，油冷散热方式与自然散热方式相比极大程度降低电机内各部件温升。冷却油与定子及端部绕组部分直接接触，对定子铁芯及绕组温升影响明显，但对转子和转轴的温升影响有限。
- 2) 电机温度分布呈两级化，定子和绕组温度相对较高，转子与轴温度相对较低，其原因主要是由于气隙的低热导率，使定子和绕组的热量难以通过气隙进行传递，同时转子和转轴一起转动，内部热量会被表面与空气的热对流所带走。
- 3) 电机在采用定子油道冷却基础上加入空心轴结构后，各部件表面油液覆盖率明显增加，且电机内部件温度均有效降低，其中转子温度降低更明显。

参考文献

- [1] Sugimoto, S. and Kori, D. (2018) Cooling Performance and Loss Evaluation for Water and Oil-Cooled without Pump for Oil. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines, Alexandroupoli, 3-6 September 2018, 1136-1141. <https://doi.org/10.1109/icelmach.2018.8507169>

- [2] Zhang, F., Gerada, D., Xu, Z., Zhang, X., Tighe, C., Zhang, H., *et al.* (2020) Back-Iron Extension Thermal Benefits for Electrical Machines with Concentrated Windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67**, 1728-1738. <https://doi.org/10.1109/tie.2019.2903758>
- [3] Ghahfarokhi, P.S., Kallaste, A., Vaimann, T. and Belahcen, A. (2019) Thermal Analysis of Totally Enclosed Fan Cooled Synchronous Reluctance Motor-State of Art. *IECON 2019—45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, 14-17 October 2019, 4372-4377. <https://doi.org/10.1109/iecon.2019.8927706>
- [4] Popescu, M., Staton, D., Boglietti, A., Cavagnino, A., Hawkins, D. and Goss, J. (2015) Modern Heat Extraction Systems for Electrical Machines—A Review. *2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis*, Turin, 26-27 March 2015, 289-296. <https://doi.org/10.1109/wemcd.2015.7194542>
- [5] Lamichhane, T.N., Sethuraman, L., Dalagan, A., Wang, H., Keller, J. and Paranthaman, M.P. (2020) Additive Manufacturing of Soft Magnets for Electrical Machines—A Review. *Materials Today Physics*, **15**, Article 100255. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100255>
- [6] Nitsche, E. and Naderer, M. (2017) Internally Cooled Hollow Wires Doubling the Power Density of Electric Motors. *ATZelektronik Worldwide*, **12**, 42-47. <https://doi.org/10.1007/s38314-017-0035-0>
- [7] Madonna, V., Giangrande, P., Walker, A. and Galea, M. (2018) On the Effects of Advanced End-Winding Cooling on the Design and Performance of Electrical Machines. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines*, Alexandroupol, 3-6 September 2018, 311-317. <https://doi.org/10.1109/icelmach.2018.8507170>
- [8] 王钰琦. 永磁同步电机温度场分析与冷却结构设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [9] Carriero, A., Locatelli, M., Ramakrishnan, K., Mastinu, G. and Gobbi, M. (2018) A Review of the State of the Art of Electric Traction Motors Cooling Techniques. *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0057>
- [10] Han, N.G., Lee, H.L., Kim, R.H., Beom, T.Y., Kim, Y.K., Ha, T.W., *et al.* (2023) Thermal Analysis of the Oil Cooling Motor According to the Churning Phenomenon. *Applied Thermal Engineering*, **220**, Article 119791. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119791>
- [11] Liu, Y., Cao, J., Song, Y., Gao, Z. and Li, L. (2023) Analysis of the Immersion Cooling of Electric Motors for Hybrid Aircraft. *Process Safety and Environmental Protection*, **178**, 695-705. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.067>
- [12] 陈晖, 黄镇财, 宾海华. 冷却流道结构对电机散热性能影响[J]. 时代汽车, 2024(12): 160-162.
- [13] 刘显茜, 李文辉, 曾朴, 等. 永磁同步电机机壳串并联混合流道液冷分析[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(2): 109-116.
- [14] 王玉恒, 刘峰, 宋凤梅. SPH 原理、发展现状及热传导问题模型[J]. 中国工程科学, 2008(11): 47-51.
- [15] 范伊杰. 新能源车用扁线电机温度场计算与油路结构优化设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [16] 杜爱民, 张东旭, 孙明伟, 等. 混合动力汽车用油冷永磁同步电机温度场研究[J]. 汽车技术, 2019(4): 34-39.
- [17] 刘慧军, 陈芬放, 黄瑞, 等. 车用驱动电机冷却系统仿真研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 2002-2012.
- [18] 江善林. 高速永磁同步电机的损耗分析与温度场计算[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [19] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 19-21.