

# 不同冷却流道参数对车载永磁电机性能的影响\*

张广杰<sup>1</sup> 章建林<sup>2</sup> 李云龙<sup>1</sup> 倪汝克<sup>3</sup>

(1. 株洲齿轮有限责任公司 新能源动力与传动系统湖南省重点实验室, 株洲 412000; 2. 湖南有色金属职业技术学院, 株洲 412000; 3. 山东大学, 济南 250061)

**【摘要】**基于 Maxwell-Fluent 对车载永磁同步电机进行电-磁-热-流耦合分析, 通过建立电机三维模型及不同结构的冷却流道, 应用计算流体力学对比分析了不同流道类型、折返方式、折返次数及进出口位置对流道压力损失及定子温度的影响, 结果显示, 进出口之间的角度为 180°、折返次数为 7 次、流道类型为圆角轴向折返型时, 冷却流道的散热性能和压力表现最好, 为车用永磁同步油冷电机冷却流道的设计和选型提供了数据支撑。

**关键词:** 永磁同步电机 耦合 压力损失 定子温度 冷却流道

中图分类号: U469.72; TM302 文献标志码: A DOI: 10.19620/j.cnki.1000-3703.20241041

## Influence of Different Cooling Channel Parameters on the Performance of Vehicle-Mounted Permanent Magnet Motor

Zhang Guangjie<sup>1</sup>, Zhang Jianlin<sup>2</sup>, Li Yunlong<sup>1</sup>, Ni Ruke<sup>3</sup>

(1. Hunan Key Laboratory of New Energy Power and Transmission System, Zhuzhou Gear Co., LTD., Zhuzhou 412000; 2. Hunan Nonferrous Metals Vocational and Technical College, Zhuzhou 412000; 3. Shandong University, Jinan 250061)

**【Abstract】**Based on Maxwell-Fluent, this paper analyzes the electric-magnetic-thermo-flow coupling of vehicle permanent magnet synchronous motor. By establishing a three-dimensional model of the motor and cooling channels of different structures, CFD is applied to compare and analyze the effects of different flow channel types, reentry modes, reentry times and inlet and outlet locations on the flow channel pressure loss and stator temperature. The results show that when the Angle between the inlet and outlet is 180°, the number of reentry is 7, and the flow channel type is rounded axial reentry, the cooling flow channel has the best heat dissipation and pressure performance. It provides data support for the design and selection of the cooling runner of the permanent magnet synchronous oil cooled motor.

**Key words:** Permanent magnet synchronous motor, Coupling, Pressure loss, Stator temperature, Cooling channel

**【引用格式】**张广杰, 章建林, 李云龙, 等. 不同冷却流道参数对车载永磁电机性能的影响[J]. 汽车技术, 2025(8): 56-62.

ZHANG G J, ZHANG J L, LI Y L, et al. Influence of Different Cooling Channel Parameters on the Performance of Vehicle-Mounted Permanent Magnet Motor[J]. Automobile Technology, 2025(8): 56-62.

## 1 前言

新能源汽车动力总成主要由电机、电控及减速器组成, 一旦电机热管理失控, 会降低电机负载能力及寿命, 严重时烧坏电机<sup>[1]</sup>。目前电机的冷却方式可以分为风冷、水冷和油冷<sup>[2]</sup>, Anderson<sup>[3]</sup>等使用计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 仿真分析了风冷电机, 并在满足电机温度要求的同时获得了合适的

轴向气隙质量流量和风阻损耗, 并将仿真结果与试验数据进行了对比。Yoon<sup>[4]</sup>等考虑了风扇效率和风扇性能, 以实现最佳风扇设计提升电机效率, 并通过试验验证了模拟结果。胡勇峰<sup>[5]</sup>等对车载永磁同步电机进行仿真和试验, 验证了风冷电机由于风速分布不同导致迎风面和背风面温度相差较大。和伟超<sup>[6]</sup>等通过数值计算研究了 V 型水冷结构电机, 得到了流体流动特性及电机温度场变化。王晓远<sup>[7]</sup>等建立了不同形状的水

\*基金项目: 湖南省科技攻关计划(2023GXGG018)。

通信作者: 章建林(1977—), 女, 副教授, 研究方向为机械制造与设计、高职教育, 1564364677@qq.com。

套模型,利用CFD方法分析得到了电机的温度场变化。Wenming Tong<sup>[8]</sup>等提出了一种水冷系统,考虑了永磁体中的涡流损耗以及定子与水套之间的装配间隙,给出了不同装配间隙处的温度分布。丁树业<sup>[9]</sup>等以一台5 500 kW核主泵屏蔽电机为例,根据有限体积法研究了水冷下电机温度的变化。徐英英<sup>[10]</sup>等应用CFD方法研究了某摩托车用电机不同结构水套、水泵转速及环氧树脂填充对流场特性及电机温度的影响。谢颖<sup>[11]</sup>等建立了油冷式扁线电机的有限元模型,对电机流体及温度场进行了模拟仿真,并分析了油路结构对电机温度场的影响。谢梦楠<sup>[12]</sup>等应用光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)方法计算得出了电机各表面与冷却油的换热系数,并研究分析了10 000 r/min额定工况下油冷电机内流动特性和温度场变化。

风冷电机虽然经济上更有优势,不需要布置复杂流道散热,但由于风向固定容易造成电机周向温度分布不均,故仅在小型新能源汽车上较为常见<sup>[13]</sup>。对于液冷电机而言,润滑油冷却比水冷更有优势,主要在于前者可以直接使用减速器同种润滑油冷却电机,散热效果更好<sup>[14]</sup>。本研究以某量产车载永磁同步油冷电机为例,基于Maxwell-Fluent进行电-磁-热-流耦合分析,从而得出最佳的定子冷却油道结构。

## 2 计算公式

基于纳维-斯托克斯(Navier-Stoke, N-S)方程的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho \mathbf{F} - \nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V} T) = \text{div} \left( \frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (3)$$

式中: $P$ 为压力梯度, $F$ 为质量力, $c_p$ 为定压比热容, $T$ 为单位体总能量, $\rho$ 为流体密度, $t$ 为时间, $\mathbf{V}$ 为速度矢量, $\nabla^2$ 为拉普拉斯算子, $\mu$ 为气体黏度系数, $k$ 为传热系数, $S_T$ 为黏性耗散项。

## 3 数学模型

使用齿轮箱中的润滑油作为冷却液能够避免设置额外的水箱,满足驱动系统一体化、集成化的要求,并且润滑油具有不导电不导磁的特性,可以直接与电机内部热源接触,传热路径短、热阻小,散热效率高。定子铁芯

是电机内部的两大热源之一,其发热量在电机高速运行时甚至能超过绕组。传统液冷方式是在机壳内开设流道,定子与冷却油之间仍存在一层机壳相隔,传热效率较低。图1为电机油冷结构示意图,为了降低热阻,本文直接在机壳内壁布置冷却油流道,冷却油与定子直接接触,且不会对电磁场造成影响。

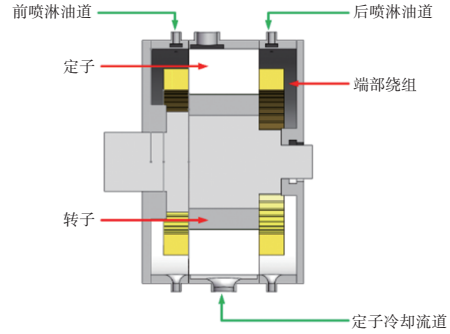


图1 电机油冷结构

在设计流道截面尺寸时,应以电机机壳的几何参数(包括周长、直径和壁厚)作为基础依据,但是由于定子和机壳之间存在装配气隙,传统的热传递路径需依次经过铁芯、气隙和机壳,导致传热路径过长且热阻较大。为显著提升热交换效率,可采取在机壳内壁直接加工油槽的创新方案,使冷却油能够与定子表面直接接触,从而优化散热性能。如图2所示, $a$ 为流道高度, $b$ 为流道宽度, $c$ 为流道间距, $d$ 为除去流道后的机壳壁厚。

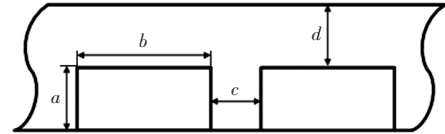


图2 流道截面

冷却油的流量可以按照以下公式进行计算<sup>[15]</sup>:

$$V_L = \frac{P_Q}{\Delta t_{oil} \cdot \rho_{oil} \cdot C_{poil}} \quad (4)$$

式中: $P_Q$ 为电机的发热量,即换热总量; $\Delta t_{oil}$ 为冷却油在循环时的容许温升; $\rho_{oil}$ 为冷却油的密度; $C_{poil}$ 为冷却油的比热容; $V_L$ 为冷却油的体积流量。

冷却流道的总换热面积可以按照牛顿冷却公式进行初步估算:

$$A = \frac{P_Q}{h \cdot \Delta t} \quad (5)$$

式中: $A$ 为定子铁芯与冷却油的接触面积,即总换热面积; $\Delta t$ 为冷却油与定子铁芯之间的温差; $h$ 为对流换热系数,可按照下式进行计算:

$$h = 0.023 \frac{C_{poil}^{0.4} \lambda_{oil}^{0.6} (\rho_{oil} u_{oil})^{0.8}}{\mu_{oil}^{0.4} \nu_e^{0.2}} \quad (6)$$

式中: $\lambda_{oil}$ 为冷却油的导热系数; $\mu_{oil}$ 为冷却油的动力黏度; $u_{oil} = \frac{V_L}{f}$ 为冷却油的流速,通过式(3)、式(4)获得; $d_e = 4f/u$ 为当量直径; $f$ 为冷却油道截面积; $U$ 为润滑周长。

根据电机损耗的理论计算和散热需求分析,为保证电机的有效冷却,在额定工况下,截面可设计成5 mm×30 mm的矩形。在此条件下,冷却油最低入口流量 $\geq 0.84$  L/min,同时流道总换热面积需要 $\geq 0.044$  m<sup>2</sup>,以此满足散热要求。若电机实际产热量超过额定工况时,可通过动态调节冷却油流量来增加散热能力,从而使电机稳定运行。

#### 4 计算与仿真

本研究以8极内置式转子磁路结构、定子为48槽、绕组为三相单层结构的永磁同步电机为研究对象,利用Maxwell中的用户自定义(User Defined Primitives)功能来快速生成各部件的具体结构,基于该模型对电机在额定运行条件下的电磁特性进行了仿真分析,从而获得了电机的磁力线分布。如图3所示,定子内部磁场分布均匀合理,磁力线在定子齿槽和磁钢附近分布均匀,磁力线分布整体合理,并未出现漏磁现象,说明该电机结构设计合理,磁钢充磁方向准确。

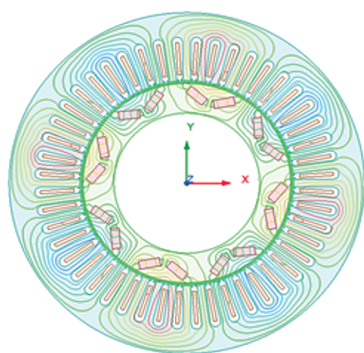


图3 磁力线分布

利用Maxwell-Fluent耦合模块计算永磁同步电机在指定工况下的稳态温升分布,永磁同步电机处于额定工况下,转速为3 000 r/min,冷却方式为自然冷却,电机工作环境温度为25℃。如图4所示,电机的最高温度达到了175.03℃,最低为109.84℃,平均温度不低于133℃,该温度远超过电机正常工作的温度范围。从电机组成来看,端部绕组的温升最高,其次是槽内绕组、定子、转子和永磁体。在这个温度下,永磁体会产生不可逆退磁,使电机寿命减小,同时会造成线圈绕组内阻增加,发热加剧,致使电机绕组绝缘失效,严重影响电机寿命和安全性。

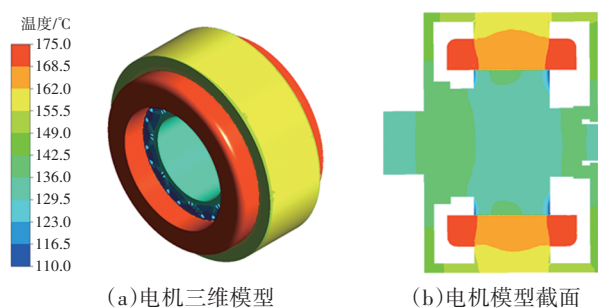


图4 电机稳态温升

图5为流道仿真模型,为优化仿真计算效率,本文简化了模型,仅保留了定子结构与冷却流道,模型边界条件为绝热环境中,冷却油参数为流道入口处的流量0.84 L/min,温度初始值为35℃,定子区域施加发热功率为724.48 W。

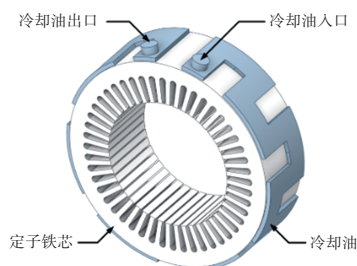


图5 流道仿真模型

#### 4.1 不同流道类型

图6为在流道截面尺寸不变、流量不变、总换热面积相近的条件下,设计了3种常见的流道类型,分别为轴向折返流道、周向螺旋流道及周向折返流道。流道基本参数如表1所示。

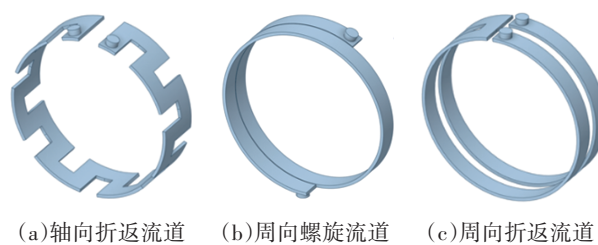


图6 流道类型

表1 流道基本结构参数

流道类型	轴向折返流道	周向螺旋流道	周向折返流道
流道高度/mm	5	5	5
流道宽度/mm	30	30	30
流道换热面积/m <sup>2</sup>	0.049	0.044	0.051

图7为稳态时的冷却油压力云图,仿真结果显示,3种流道呈现典型的压力梯度分布特征,最大压力点出现在入口处,最小压力点出现在出口处。其中压力损失从小到大依次为:轴向折返流道、周向螺旋流道、周向折返流道。轴向折返流道展现出最优的液压性能,周向螺旋流道和周向折返流道两者的压降相比于轴向折返流道

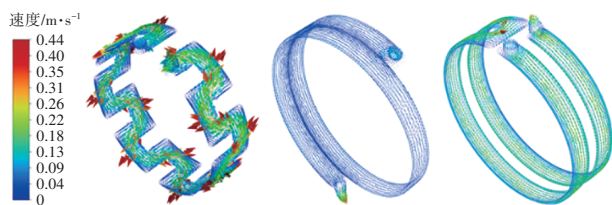
方案分别高出了 553.1 Pa、1 352.74 Pa,说明轴向折返流道具有更好的压降表现效果。



(a)轴向折返流道 (b)周向螺旋流道 (c)周向折返流道

图7 不同流道类型的冷却油压力分布

此外,结合图8可以看出,周向螺旋流道和周向折返流道类型的冷却呈现稳定的层流状态,因此,冷却油压力只会随着其路程的增加而均匀变化。轴向折返流道的冷却油流速在折弯区域明显增大,产生了较大的速度梯度,高剪切流动会导致黏滞耗散加剧,从而产生较大的局部压力损失,因此,需对折返区域进行进一步优化。



(a)轴向折返流道 (b)周向螺旋流道 (c)周向折返流道

图8 不同流道类型的冷却油流速分布

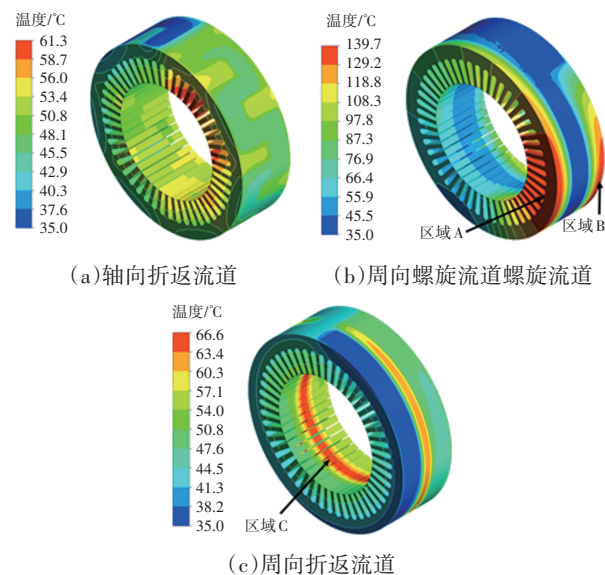
图9为稳态时的定子温度云图,可以看出定子与冷却油直接接触区域温度明显较低,温度梯度依赖于流动方向,近进油口区域温度小于远离进油口区域,最高温度从低到高的顺序为轴向折返流道、周向折返流道、周向螺旋流道,流道结构的最高温度和最大温差呈现相同的排序规律。轴向折返流道综合冷却性能最优,周向螺旋流道和周向折返流道分别比轴向折返流道最高温度高出 78.35 °C和 5.43 °C,最大温差分别增大 78.27 °C和 5.55 °C。

综上所述,由表2可以得出在相同的边界条件下轴向折返流道冷却油的压力损失最小、散热性能最好,但因为折弯区域存在较大的压力损失,需要对其进行进一步的优化设计。

#### 4.2 不同折返方式

由上述分析可知轴向折返流道冷却油在折弯区域的流速变化会产生黏滞力,导致压力损失。图10为在保证流道截面积基本不变的情况下提出了两种改善流道的优化策略:圆角轴向折返流道和S形轴向折返流道,即对折弯区域进行了圆角处理和S形处理,从而实现流速梯度的平缓过渡,该设计在相同的边界条件下,

比较了直角轴向折返流道与改善后流道的散热性能和压力表现,进一步选出合适的折返类型。



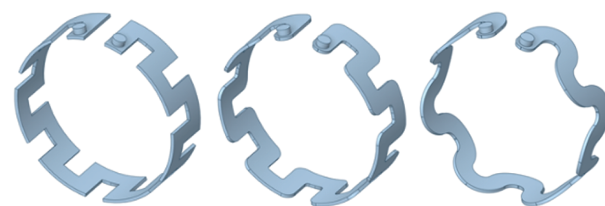
(a)轴向折返流道 (b)周向螺旋流道螺旋流道

(c)周向折返流道

图9 不同流道类型的定子温度分布

表2 不同流道类型压力及温度分布比较结果

流道类型	轴向折返型	周向螺旋型	周向折返型
压力损失	较好	一般	较差
温度分布	较好	一般	较差



(a)直角折返流道 (b)圆角折返流道 (c)S型折返流道

图10 不同折返方式的轴向折返流道

图11为稳态时的冷却油压力云图,仿真结果得出所有流道类型均遵循相同液压特性,最大压力出现在冷却油入口区域,最小压力出现在冷却油出口区域,压力梯度值沿流动方向递减。相比于直角型,改良后的流道性能更好,并且压降小,在折弯区域流动更加平滑、局部损失更小,压降分别减小了 209.24 Pa和 354.59 Pa。结合图12可以更加直观地看出,冷却油流道优化后效果直接反映出其压力表现。相比于直角型,圆角型和S型的流速分布更加均匀,折弯区域的高速区占比缩减,速度梯度分别降低了 6.8%和 11.3%,从而显著地减少了内摩擦作用,液体流动更加稳定平滑,因此流道的压力损失更小。

图13为稳态时的定子温度分布云图,对比直角、圆角和S型三种折返流道时,直角折返流道表现出最佳的散热性能,其定子最高温度和最大温差均为最低。

其次是圆角折返流道,其最高温度比直角型高出 1.9 °C,最大温差也相应增加了 1.9 °C。S形折返流道的散热效果相对最弱,最高温度比直角折返流道高出 9.7 °C,最大温差则增加了 9.5 °C。此外,观察发现与冷却油直接接触的定子区域温度较低,且越靠近进油口时温度呈现下降趋势。



图 11 不同折返方式的冷却油压力分布

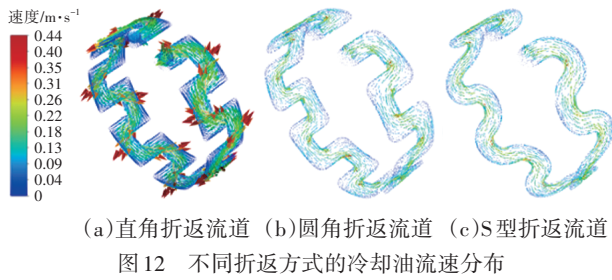


图 12 不同折返方式的冷却油流速分布

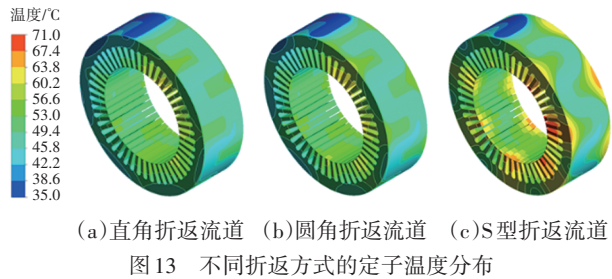


图 13 不同折返方式的定子温度分布

综上所述,根据表 3 的分析,圆角折返流道和 S 型折返流道都优化了冷却油的压力表现。然而,S 型设计带来了明显的温升问题。相比之下,圆角折返流道在保证压力改善的前提下,对温升性能的影响较小。基于其在压力性能和散热性能之间的平衡,圆角轴向折返流道被确定为定子冷却流道的优选方案。

表 3 不同折返方式压力及温度分布比较结果

流道类型	直角折返流道	圆角折返流道	S 型折返流道
压力损失	较差	一般	较好
温度分布	较好	一般	较差

### 4.3 不同折返次数

本文在相同边界条件下研究了折返次数分别为 3、5、7、9、11 次的流道性能。图 14 为稳态时的冷却油压力变化云图,可以看出流道的压力分布均为进油口处的压力最大,出油口处的油道压力最小。折返次数越多,压力损失越大,从 3 次折返到 11 次折返,压降由 3 112.82 Pa 激增至 4 277.71 Pa,增幅达 37.4%。这主要

源于两方面:一是流道长度随折返次数增加而延长,导致沿程损失增大;二是更多的折返点意味着更多的局部损失。此外,结合图 15 可以更加直观地可以看出,折返次数增加会提升冷却油流速,并在折弯区域形成更大的速度梯度,从而加剧流体内部黏滞力作用,进一步放大局部损失。相比于 3 次折返,11 次折返的速度梯度提升了 13.2%,因此,为有效控制压降,设计时应尽量减少折返次数。

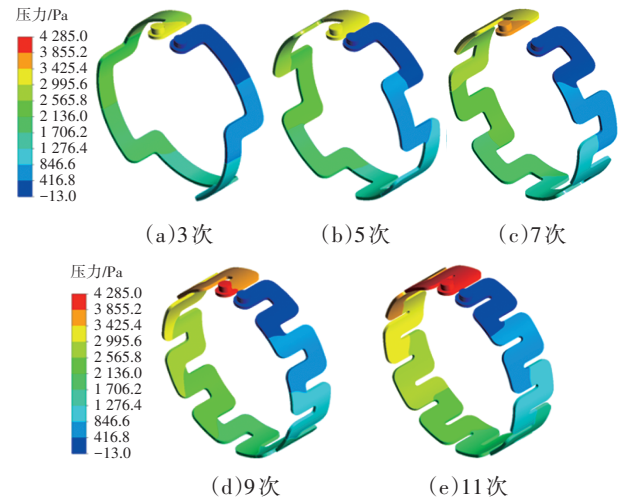


图 14 不同折返次数的冷却油压力分布

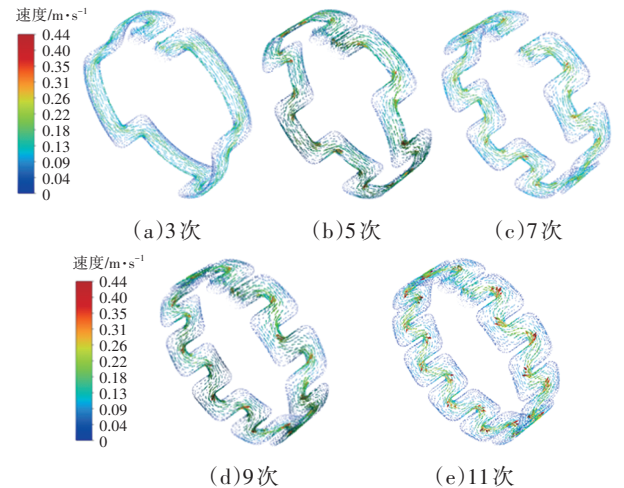


图 15 不同折返次数的冷却油流速分布

图 16 为稳态时的定子温度分布云图,可以看出定子温度在接触冷却油区域最低,且沿进油口方向递减。另外提高折返次数不仅降低了最高温度,更有效改善了温度均匀性。对比数据可知,当折返次数从 3 次增加到 11 次,定子最高温度成功降低了 36.49 °C,而最大温差的降幅也达到了 36.07 °C,表明热管理效果得到显著提升。

通过以上分析数据得出,折返次数越多,散热效果增强会伴随着压力损失增大。图 17 为不同折返次数条件下的温度及压降变化曲线,清晰展示出 7 次折返是两

者之间的最佳平衡点,流道可以达到可接受的压力水平,又可以提供满足设计需要的散热能力。

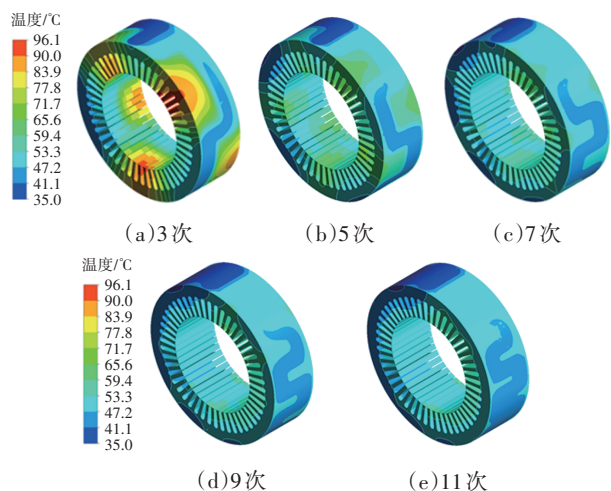


图16 不同折返次数的定子温度分布

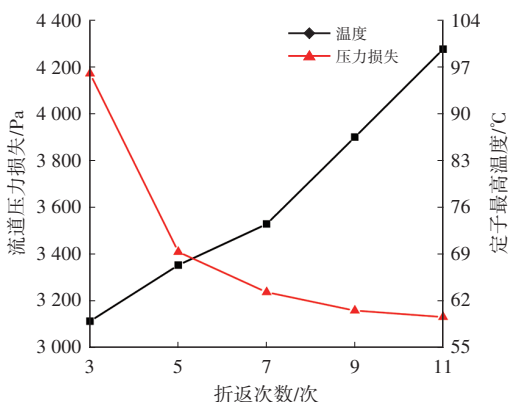


图17 不同折返次数条件下的温度及压降

#### 4.4 不同进出口位置

如图18所示,为优化流道性能,在相同边界条件下,探索了不同进出口位置流道的性能,以进口与出口之间的夹角25°为初始方案,对比研究了90°、180°两种方案。

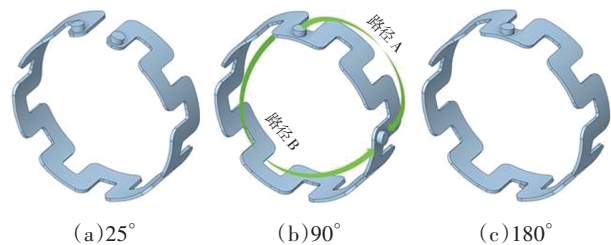


图18 不同进出口位置条件下的流道

图19为稳态时的冷却油压力云图,所有方案均呈现进油口压力最高、出油口压力最低分布规律。然而,90°和180°方案的压力表现显著要好于初始方案,其压降分别仅为711.12 Pa和885.65 Pa。90°和180°的设计流道内的流体相当于形成了双流动路径,每条路径的长度和折返次数均少于初始方案,从而能有效地降低沿程损失和局部损失,使得压力表现可以优化。此外,结

合图20可以更加直观地看出,90°和180°条件下的冷却油流速相比初始方案更低,沿程损失更小。折弯区域的速度梯度会更小,流体粘滞力的影响会被弱化,局部损失就会更小。

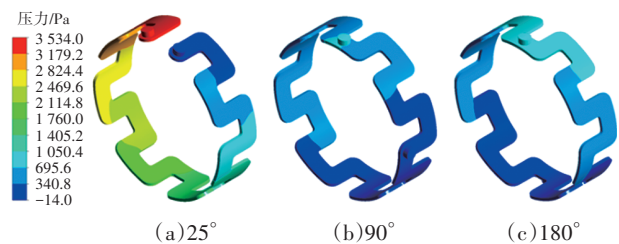


图19 不同进出口位置条件下的冷却油压力分布

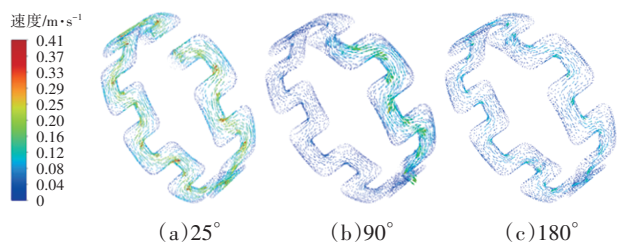


图20 不同进出口位置条件下的冷却油流速分布

图21为稳态时的定子温度分布云图。与25°初始方案相比,90°方案的定子热性能明显较差,其最高温度升至82.54 °C,增大了达30.4%,最大温差为47.07 °C,增大了71.5%。而180°方案的温度水平与初始方案基本持平,未观察到显著变化。

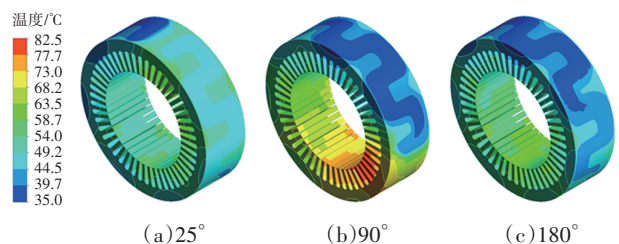


图21 不同进出口位置条件下的定子温度分布

综上所述,由表4可以得出进出口位置相差90°的压力损失性能最好,25°时压力损失性能较差,对于温度分布较差是相差90°时,其余两者无明显差异,因此180°时可以同时兼顾压力损失和温度分布性能。

表4 不同进出口位置压力及温度分布比较结果

进出口类型	角度相差25°	角度相差90°	角度相差180°
压力损失	较差	较好	一般
温度分布	较好/一般	较差	较好/一般

## 5 结束语

本研究基于 Maxwell-Fluent 对车载永磁同步电机进行电-磁-热-流耦合分析,通过分析不同构型的流道得到了角度为180°、折返次数为7次、流道类型选用圆角轴向折返型时冷却油的散热性能和压力表现最好,可

以采用此种结构作为定子冷却流道。

### 参 考 文 献

- [1] 陈黎. 车用永磁同步电机冷却系统设计与优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
CHEN L. Design and Optimization of Cooling System of Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [2] 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.  
LIU H J, CHEN F F, HUANG R, et al. Simulation Research on Cooling System of Vehicle Drive Motor[J]. Journal of Central South University (Natural and Technology), 2020, 51(7): 2002-2012.
- [3] ANDERSON K R, LIN J, MCNAMARA C, et al. CFD Study of Forced Air Cooling and Windage Losses in a High Speed Electric Motor[J]. Journal of Electronics Cooling & Thermal Control, 2015, 5(2): 27-44.
- [4] YOON M K, JEON C S, KAUH S K. Efficiency Increase of an Induction Motor by Improving Cooling Performance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion Ec, 2002, 22(1): 66-67.
- [5] 胡勇峰, 吴江权, 吕世超. 风冷永磁驱动电机冷却设计及仿真分析[J]. 防爆电机, 2022, 57(1): 8-12.  
HU Y F, WU J Q, LV S C. Cooling Design and Simulation Analysis of Air-Cooled Permanent Magnet Drive Motor[J]. Explosion-Proof Electric Machines, 2022, 57(1): 8-12.
- [6] 和伟超, 吴建华. 电动汽车驱动电机水冷系统的设计及其温度场分析[J]. 轻工机械, 2013, 31(5): 19-25.  
HE W C, WU J H. Electric Vehicle Drive Motor Cooling System Design and Its Temperature Field Analysis[J]. Journal of Light Industrial Machinery, 2013, 31(5): 19-25.
- [7] 王晓远, 刘云飞. 基于FEM的电动汽车用电机水冷系统分析[J]. 微电机, 2014, 47(5): 9-12.  
WANG X Y, LIU Y F. Analysis of Electric Vehicle Motor Water Cooling System Based on FEM[J]. Micromotors, 2014, 47(5): 9-12.
- [8] TONG W, TANG R, AN Z. Water Cooling System Design and Thermal Analysis for Low Speed Permanent Magnet Machines[C]// Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, China: IEEE, 2011.
- [9] 丁树业, 孟繁东, 葛云中. 核主泵屏蔽电机温度场研究[J]. 中国电机工程学报, 2012(36): 149-155+1.  
DING S Y, MENG F D, GE Y Z. Nuclear Main Pump Canned Motor Temperature Field Study[J]. Proceedings of the CSEE 2012(36): 149-155+1.
- [10] 徐英英, 文怀兴, 谭礼斌, 等. 某电机环形水套流场计算流体动力学模拟及结构优化[J]. 科学技术与工程, 2022(3): 1066-1022.  
XU Y Y, WEN H X, TAN L B, et al. Computational Fluid Dynamics Simulation and Structural Optimization of Annular Jacket Flow Field of A Motor[J]. Science Technology and Engineering, 2022(3): 1066-1022.
- [11] 谢颖, 范伊杰, 蔡蔚, 等. 油冷式扁线电机油路结构优化设计及温度场计算[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(5): 37-45.  
XIE Y, FAN Y J, CAI W, et al. Optimal Design of the Oil Circuit Structure and Temperature Field Calculation for Oil-Cooled Flat Wire Motors[J]. Journal of Motor and Control, 2023, 27(5): 37-45.
- [12] 谢梦楠, 秦文瑾, 张雯, 等. 油冷式永磁同步电机流场及温度场分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2558-2567.  
XIE M N, QIN W J, ZHANG W, et al. Oil Cooled Flow Field and Temperature Field Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of modeling and simulation, 2024, 13(3): 2558-2567.
- [13] 杜静娟. 电动汽车用高效高功率密度电机的设计与研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
DU J J. Design and Research of High Efficiency and High Power density Motor for Electric Vehicle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [14] 胡攀, 陈东亚, 韦虹. 电机油冷设计对电机性能影响的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(5): 158-162.  
HU P, CHEN D Y, WEI H. Research on Effect of Oil Cooling Design on Motor Performance[J]. Mechatronics Development and Innovation, 2023, 36(5): 158-162.
- [15] 高峰. 某型纯电动汽车热管理系统研究分析[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2019.  
GAO F. Research and Analysis of Thermal Management System for a Type of Pure Electric Vehicle[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2019.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2024年12月23日。