

基于 FLUENT 的电机热设计

Motor thermal design based on fluent

郭子瑜 赵硕 张小冬

(上汽商用车技术中心)

摘要:目前电机的冷却方式有风冷、水冷和油冷三种形式, 本文重点研究水冷电机。本文基于电机电磁损耗发热机制和冷却水套传热散热机制, 采用 FLUENT 软件, 搭建了电机热仿真的数值仿真模型, 通过流场与温度场的耦合, 确定了电机三维温度分布。通过分析传统冷却水套的散热效果, 提出了一类新型双通道冷却水道结构, 解决了高功率密度电机散热问题, 并使冷却后的电机温度均匀分布, 有效解决了轴向温差问题。

关键词: 汽车 电机冷却 水套 CFD

Abstract: At present, there are three cooling modes in motor: air cooling, water cooling and oil cooling. This paper focuses on the water-cooled motor. Based on the mechanism of electromagnetic loss and heat transfer of cooling water jacket, this paper uses FLUENT software to build a numerical simulation model of motor thermal simulation. By the coupling of flow field and temperature field, the three-dimensional temperature distribution of motor is determined. By analyzing the heat dissipation effect of the traditional cooling water jacket, a new type of dual channel water-jacket is proposed, which solves the heat dissipation problem of the high power density motor, makes the temperature of the motor evenly distributed, and effectively solves the axial temperature difference problem.

Key words: automobile; motor cooling; water-jacket; CFD

1. 引言

电机温升是电机设计过程中的关键项目之一, 正确分析和计算电机各部件的温升, 掌握电机内的温度分布, 不仅可以保证在设计阶段及时优化电机设计方案, 并且可为电机的安全、高效运行奠定坚实基础^[1-3]。电机因损耗产生的热量向外传递, 流经机壳内冷却水套的冷却液与水套发生热交换, 将热量带入冷却系统, 小部分通过机壳与端盖散发到周围环境。水道内冷却液的流动与传热是冷却系统工作的核心环节^[4]。目前数值分析方法是研究电机冷却系统流动和传热的重要手段。

目前, 国内外学者对于水冷电机冷却水套的研究已经取得了很多成果。王晓远等^[5]基于85kW高功率密度电机, 比较了轴向型、周向型和螺旋型三种冷却水套的冷却效果, 并结合水泵功率、加工难易等多方面, 选取了最优的螺旋型水套。Pechanek等^[6]应用计算流体力学分析了轴向和周向两种水道结构对电机的冷却效果, 他们的研究指出, 相同条件下轴向水套的冷却水温升较小, 但压力损失却是周向的六倍。Ye等人对比了周向、轴向、螺旋、半螺旋这四种水道结构, 在对流阻和散热效果进行综合考虑后, 得出周向结构更适合电机的冷却^[7]。最常见的电机冷却水套有轴向和周向两种, 具体有螺旋式、工字型、Z字型、迷宫型或者扰流型水套。但是这些水套都有不同程度的问题: (1) 螺旋、工字、Z字和迷宫型水套有明显的温度梯度, 不利于电机的均匀散热。例如轴向的冷却水套, 由于冷却液从电机上端流入从下端流出, 会使电机表面存在温度梯度, 进而使电机两端存在温差, 由于金属热胀冷缩的特点, 电机的两端会出现不同轴、噪音增大等问题, 降低电机的使用寿命。(2) 扰流型水套虽然能够让冷却液与机壳接触更充分, 但是流动不可控, 不能保证电机表面温度均匀。(3) 目前的水套只关注了电机定子的冷却, 忽视了轴承的冷却。

因此合理设计电机的冷却水套对电机的可靠运行非常重要。

与理论分析和实验研究相比,计算流体力学具有成本低、时间短、可信度高等优势,对电机冷却水套的设计有指导意义。本文基于FLUENT软件,分析了当冷却液入水口温度为65℃时,65kW电机的散热问题,并通过与传统水套的对比,提出了一类新型冷却水套结构:双通道型电机冷却水套。这类水套不仅能解决高功率密度的电机散热问题,并且可以有效解决电机的轴向温差问题。

2. 数值计算模型

2.1 CFD 理论基础

(1) 热源

电机总损耗为热源,总损耗由铁损、摩擦损耗、定子铜损、转子铜损和杂散损耗组成,表达式为:

$$P_{\text{loss}} = P_c + P_{w1} + P_{w2} + P_r + P_{\text{str}} \quad (1)$$

其中, P_{loss} 为总损耗, P_c 为铁损, P_{w1} 、 P_{w2} 为定、转子铜损, P_r 、 P_{str} 分别为风摩擦损耗和耗散。

(2) 流体模型确定

流体模型由雷诺数决定,雷诺数为:

$$Re_x = \rho u \frac{d}{\eta} \quad (2)$$

其中 $\rho = 1048.83 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, u 为冷却液流速为 1.13 (m/s) , η 为冷却液动力粘度 $1.29 \text{ (mPa} \cdot \text{s)}$, d 为进水口直径 25 (mm) 。计算得到雷诺数为 22950 。该雷诺数 > 2300 , 因此确定为湍流流动,选用标准 $k - \epsilon$ 模型。

2.2 电机机壳模型

该电机的额定功率为 65 kW , 由转子、定子、水套、外壳等部件组成。本文重点研究冷却水套对电机壁面温升的影响,因此对模型进行了简化。冷却液为 50% 的乙二醇溶液,流量为 8 L/min , 进水口温度为 65°C 。通过 Maxwell 软件计算出该电机的铁损、铜损等损耗:该电机额定功率的热功耗为 5656 W 。

表 1 电机机壳材料及冷却液属性

项目	定子 M155 钢	壳体 z1101A	Gu	冷却液
比热 (J/kg.k)	434	837	385	3454
导热(W/m.k)	42.5	150	400	0.406
密度(g.cm ⁻³)	7.7	2.8	8.9	1.048



图 1 电机机壳模型

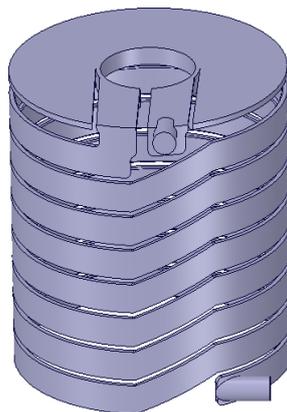


图 2 流体域

2.3 冷却水流道模型及网格处理

经过之前很多学者的研究,综合考虑了各种水道的优缺点,本文直接选用周向螺旋式水道,通道尺寸为 $25\text{mm}\times 6\text{mm}$ 。根据机壳模型的参数,建立有冷却水道的机壳有限元模型,如图3所示。该冷却水道为螺旋式水道,为了冷却端盖和轴承,做了特殊处理,在端盖和轴承部位也布置有水套,水从入水口进入,绕轴承一周同时流向端盖,当端盖和轴承内冷却液已满时,流出端盖,流向电机机身。利用Fluent软件的网格处理模块Fluentshaping进行网格划分,网格以四面体为主。为改善出口流动,拉伸出口长度为 $10d$,其中 d 为出口特征长度。根据流道最小尺寸 6mm ,为保障最小尺寸有三层网格以及考虑到计算资源的问题,设置最小网格尺寸为 2mm 。通过改变全局尺寸来验证网格无关性,考虑到计算精度和计算量,最终选取体网格总数为787万。

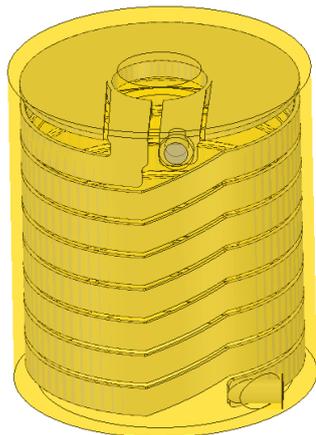


图3 冷却水套

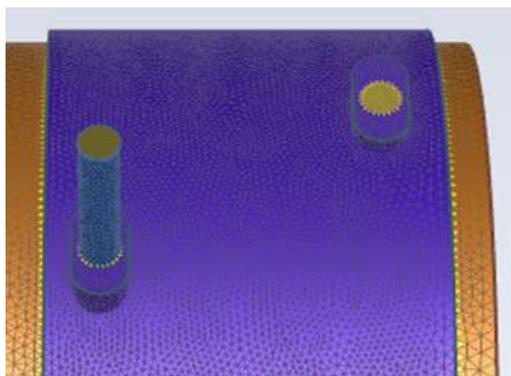


图4 局部网格

3. 计算结果及分析

3.1 温度场分析

通过计算,得到体积流量为 $8\text{L}/\text{min}$ 时,该水道结构对电机的冷却效果,如图5所示。水从入水口流入,首先流进轴承然后流满端盖,开始向机身流动。冷却液温度为 65°C ,端盖处因未与热源直接接触,且又接近冷却液入口,温度最低。该电机的轴向温度梯度很大,最高温度高达 88°C ,与最低温度 65°C 的温差高达 23°C 。电机外壳的温度随螺旋水套的流动也呈螺旋状上升,均温性较差。出口旁是温度最高点,从水套的布置形式可以看出,该处未布置水套,为散热死点,因此温度最高。该水套的压差为 19.8kPa ,且从压力云图中可以看出,压力主要集中在入口水套处,对入口处进行合理优化可以减小该处流阻。

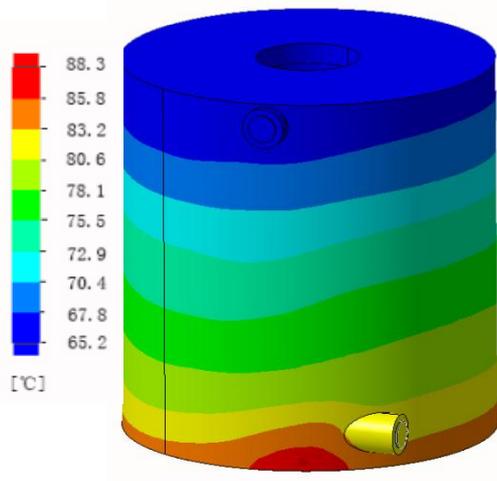


图5 机壳表面温度

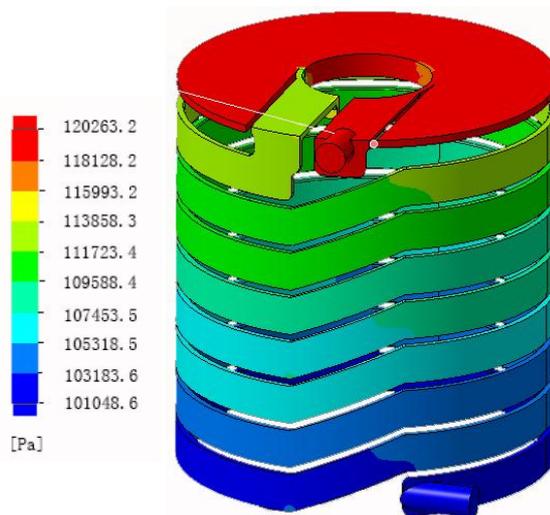


图6 压力分布

根据公式 $Q = CM\Delta t$ ， Q 为冷却液带走的热量，在本文中为热功耗， C 为冷却液比热容， M 为冷却液质量， Δt 为冷却液温升。 $C=3.45\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，流量为 $8\text{L}/\text{min}$ ，密度为 $1048.83(\text{kg}/\text{m}^3)$ 当 $Q=5656\text{W}$ 时， $\Delta t=11.7^\circ\text{C}$ ，当 $Q=12596\text{W}$ 时， $\Delta t=26.1^\circ\text{C}$ 。

表 1 仿真结果

	壳体表面最大温度 ($^\circ\text{C}$)	冷却液出水口温度 ($^\circ\text{C}$)	冷却水道压降 (kPa)	理论计算冷却液温升 ($^\circ\text{C}$)	误差
5.6kW 工况	88.3	77.1	19.8	11.7	3.4%
12.6kW 工况	113.9	91.0	19.6	26.1	0.4%

3.2 优化设计

通过结果可以看出，目前水套存在均温性差、冷却死点和压力局部过大等问题，本文针对这些问题，对该冷却水套进行了优化。为减小温度梯度，单通道改为双通道，从电机的的两端分别流入；为减小进水口处过高的局部压降，进水口处改为螺旋入口；为解决冷却死点问题，取消螺旋式水道，改为 Z 字型水套。如图 7 图 8 所示，冷却液流向见箭头方向，两个入口，两个出口。入口一在上端轴承位置，出口一在最下端。入口二在最下端出口一附近，出口二位于电机机身上端。

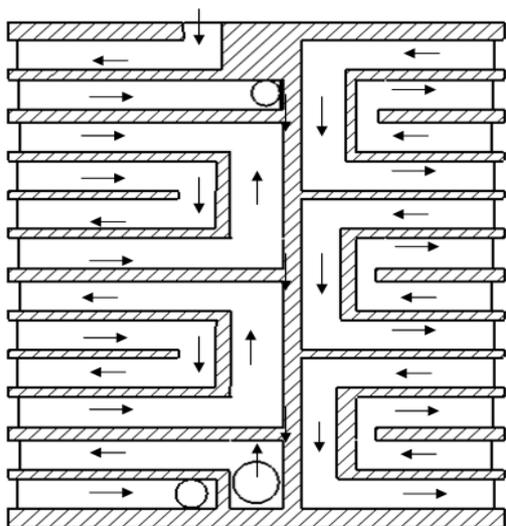


图 7 优化后水套平面图



图 8 优化后水套三维图

3.3 优化前后对比

优化后的仿真针对 5656W 额定工况。优化前的电机壳体轴向温差较大，且存在冷却死点，主要原因是冷却水道中的冷却液随流动温度逐渐升高，导致冷却能力降低，电机出现轴向温差，见图 9。优化后的水道，温度云图如图 10，因为出口一紧挨入口二，出口二紧邻入口一，出入口相邻，使高温和低温得到了补偿，因此该水套的温度比较均匀，最终电机壳体的温度也均匀，该冷却水道使电机温升降低了 7.6°C 。该布置形式也消除了散热死点的问题，因此不存在局部温度过高的问题。图 12 为水道压力云图，由于是 Z 字型水道，且水道也由之前的 8 条增加到了 12 条，因此流阻会有所上升，但由于入口改为螺旋状，大大减小了局部流阻，因此总流阻仅增加了 1.6kPa 。优化后的冷却水套解决了电机轴向温度梯度、散热死点、局部流阻过大的问题。

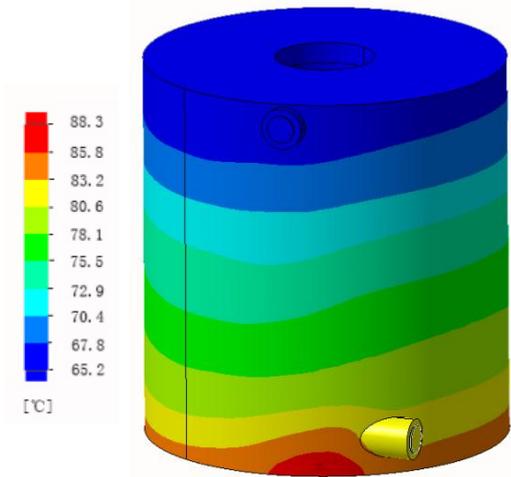


图 9 优化前的机壳温度

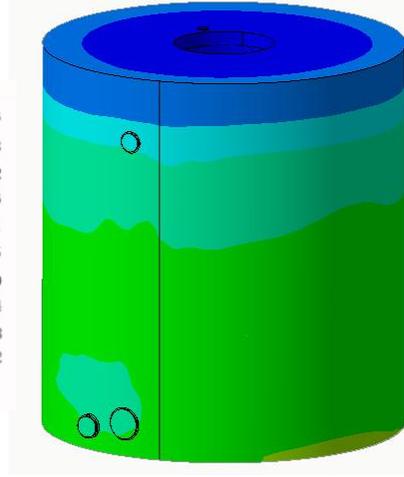


图 10 优化后的水道温度

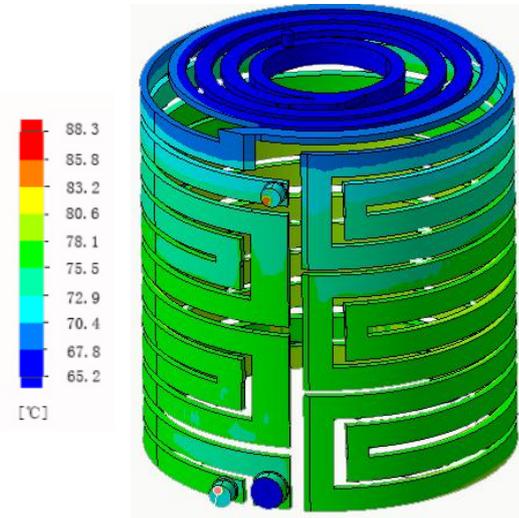


图 11 优化后的水道温度

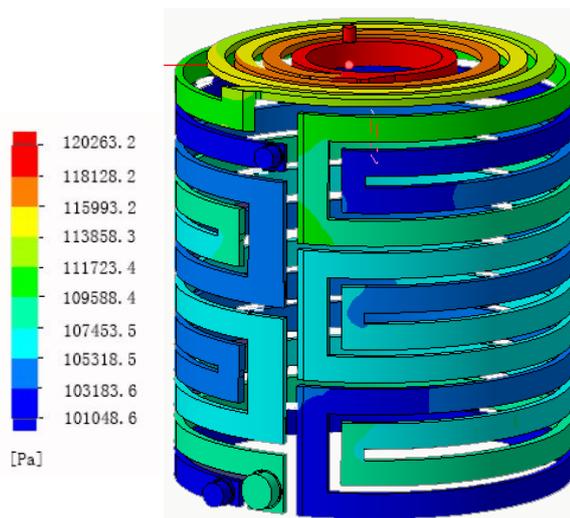


图 12 优化后的水道压力

表 1 仿真结果

	参数	值
优化前	压降 (kPa)	19.8
	壳体最高温度 (°C)	88.3
优化后	压降 (kPa)	21.4
	壳体最高温度 (°C)	80.7

4. 结论

本文以一台额定功率为 65kW 的永磁同步电机为研究对象，在电机采用水冷的冷却方式情况下，对电机的温度场进行分析，研究了电机冷却水道对温度分布的影响，并针对螺旋型冷却水道对该电机的冷却效果进行分析和优化，得出以下结论：

(1) 螺旋式水道在布置时, 无法布满水套内壁, 存在冷却死点, 进而造成局部温度过高的问题。

(2) 单通道的水道, 随着冷却液的流动, 温度逐渐升高, 冷却能力下降, 均存在不同程度轴向温差过大的问题。

(3) 本文提出的双通道 Z 字型冷却水道可以有效抑制电机的轴向温差, 减小热不平衡的影响, 提高了电机的 NVH 性能、稳定性和寿命。

5. 参考文献

[1] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[J]. 北京: 科学出版社, 1992.

[2] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[3] A·M-鲍里先科, B·r·单科, A·M·亚科夫列夫. 电机中的空气动力学与热传递[M]. 魏书慈, 邱建甫译. 北京: 机械工业出版社, 1985. ..

[4] Leutwyler Z, Dalton C. A CFD study of the flow field, resultant force, and aerodynamic torque on a symmetric disk butterfly valve in a compressible fluid [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2008, 130 (2): 1030-1036

[5] 王晓远, 杜静娟. 用CFD流固耦合热分析车用高功率密度电机的水冷系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 30-38.

[6] PECHANK R, BOUZEKL L. Analyzing of two types water cooling electric motors using computational fluid dynamics[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. Novi Sad: IEEE, 2012:4-6.

[7] YE Z N, LUO W D, ZHANG W M, et al. Simulative analysis of traction motor cooling system based on cfd[C]//International Conference on Electric Information and Control Engineering. Wuhan: IEEE, 2011:746-749.