

电机内流场分析

Electric motor flow field analysis

张海凤 钟修林
湘潭电机股份有限公司

摘要: 本文采用大型 CFD 仿真分析软件—STAR-CD 对空冷却器电机的内流场进行仿真分析, 得出电机内部流场的分布情况, 对各部分的散热情况有了更好的了解, 为今后电机结构的改进设计提供理论依据。

关键词: 电机、内流场、流场分析、STAR-CD

Abstract: The inner flow field of electric motor was simulated using STAR-CD, one of the most famous CFD codes. The inner flow field was researched by detail. Though the analysis, we got the good knowledge of heat transfer of all parts. All theses was the foundation of the structure improve.

Key words: electric motor、inner flow、flow field analysis、STAR-CD

1 前言

电机的设计要考虑到电磁、结构及流场换热三个大的方面, 而这三个方面有时又存在着矛盾, 无法同时兼顾, 因此, 在电磁方案确定之后, 要找到结构与流场的切合点, 既满足电机的结构要求, 又满足电机的散热要求。内部结构复杂, 尤其是铁心与线圈, 而这两个结构又是电磁的核心部分, 对流场影响较大, 因此, 不能做太多的简化, 这就给流场分析带来了很大的困难, 尤其是网格的处理就更困难。目前, 国内对整机的流场仿真分析资料较少, 对电机流场的分析多还停留在感性的经验设计阶段, 只能对内部流动情况作较粗略的估测, 这无法满足内部结构的优化设计要求。本文采用 STAR-CD 仿真分析软件对电机内部流场进行分析, 得到铁心段通风槽及线圈端部的风速, 得到电机内部风量的分配情况, 从而可以判断各部分的散热情况, 并为以后的改进设计提供依据。

2 模型的建立

2.1 数学模型

STAR—CD 在求解流动与传热问题时, 需要求解伴有热传递的三维不可压缩湍流的 $N-S$ 方程^[8]。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = s_m \quad (1)$$

式中， t 为时间； $x_j(j=1,2,3)$ 为坐标； ρ 为密度； u_j 为气流速度在三个坐标上的分量； s_m 为质量源项；

动量守恒方程为：

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

式中， p 为气体压力； s_i 为动量源项； τ_{ij} 为作用在与 i 方向相垂直的平面上的 j 方向上的应力

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_j u'_i}, \quad \mu \text{ 为动力粘性系数, } s_{ij} \text{ 为流体变形率张量 } s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

u' 为湍流脉动速度, δ_{ij} 为克罗内尔符号。

能量守恒方程为：

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h + \overline{\rho u'_j h'}) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_h \quad (3)$$

式中， h 为气体的比焓； s_h 为能量方程的源项。

2.2 几何模型

采用三维 CAD 软件对电机内风路进行整体建模，电机内风路主要由转子、定子、机壳和冷却器组成，除机壳外，每一部分都很复杂，都存在细小结构，但像通风槽板这样小的结构对风路的影响却比较大，因此，因此不能进行过大简化。电机内风路结构如下图（蓝色箭头代表空气的流动方向，空气由风扇抽入机体，通过转子定子部分，然后进入冷却器，形成不断地循环过程）：

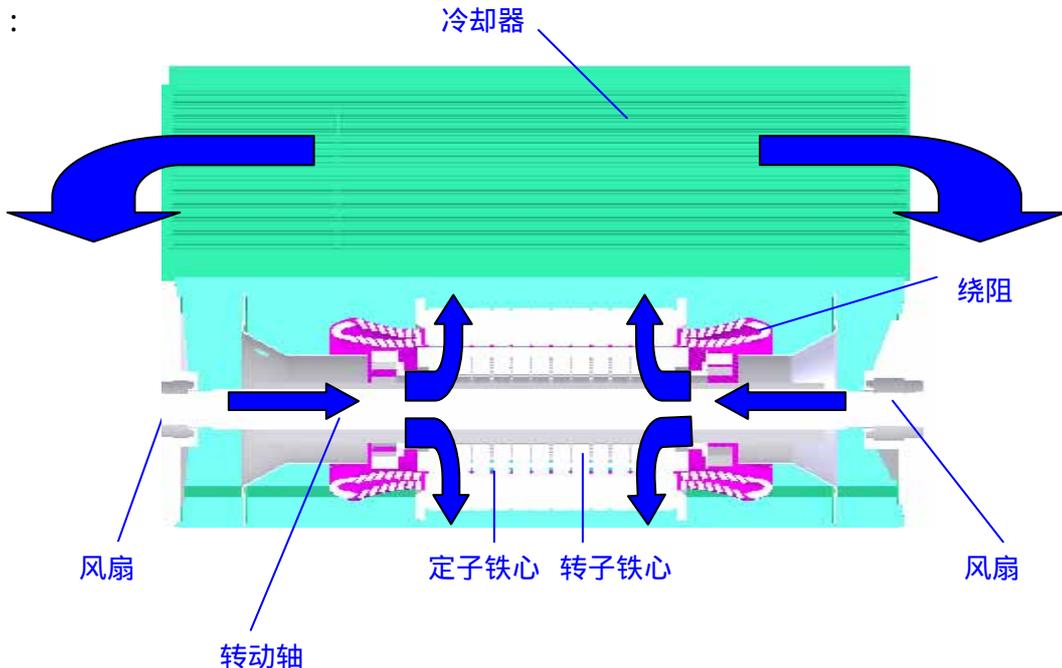


图 1 内风路几何模型

2.3 网格模型

由于几何模型结构复杂，根据结构特点采用四面体与六面体网格相结合的策略，网格数量约 620 万，电机内风路结构及整体网格模型如下图：

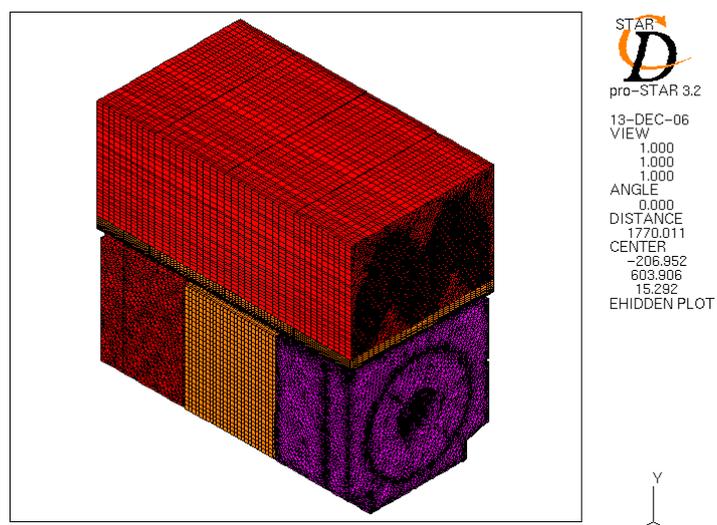


图 2 内风路整体网格模型

其中转子铁心和定子铁心部分采用非结构化网格 ICEM—CFD 进行划分，采用全六面体网格，网格如下图所示：

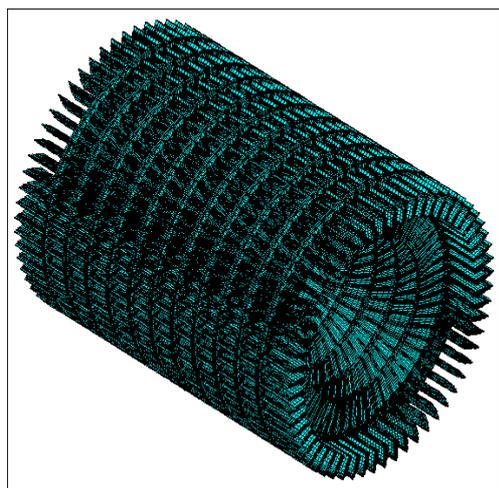


图 3 转子铁心网格模型

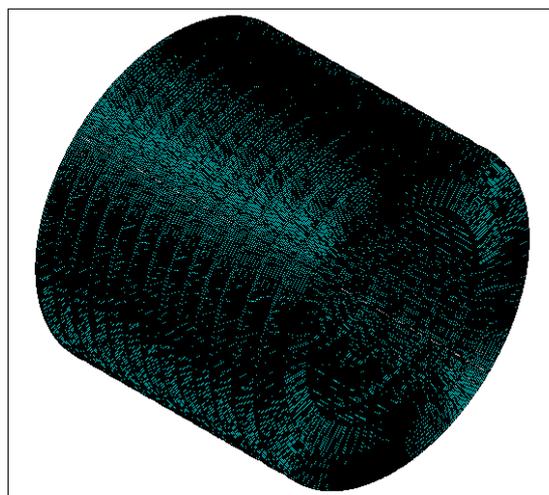


图 4 定子铁心网格模型

线圈部分则由于结构复杂，采用全四面体网格自动生成，网格如下图所示：

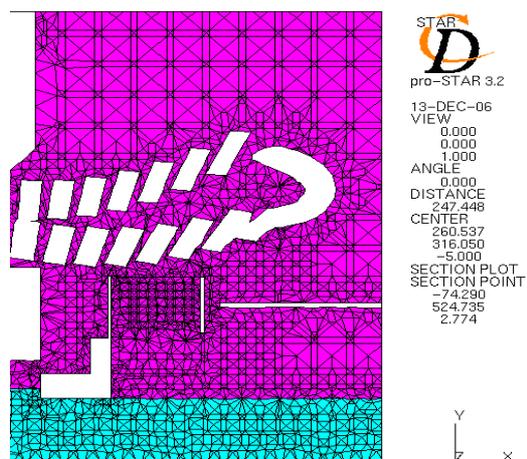


图 5 线圈端部网格

冷区器部分则采用三棱柱体网格，根据三角形表面拉升而成，网格如下图所示：

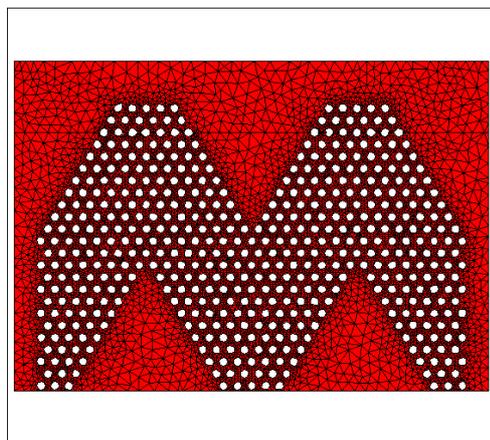


图 6 冷却器网格模型

2.4 边界条件及计算模型

求解在 star-cd3.26 上进行，当电机运转时内部空气的流动由于旋转及电机结构的复杂性，空气的流动处于高 Re 数区，因此在流动模型的选取时采用了 $k-\epsilon$ 高雷诺数模型，同时伴随热量交换。转子转动部分采用 MRF 动量源方法，在转子上加上转动惯量。

迭代计算在一台 P 3.0G(内存 4G)上进行，经过迭代各项指标趋于收敛。对计算结果在 star-cd 中进行后处理得到以下一些结果。

3 计算结果

3.1 速度场计算结果

提取不同位置截面进行速度分析，如下所示：

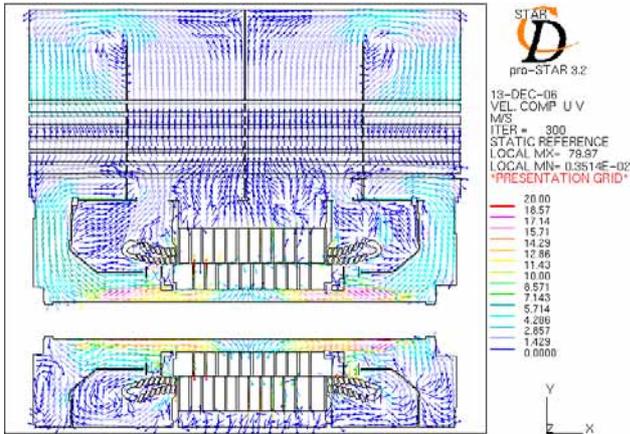


图 7 电机内部流速分布图

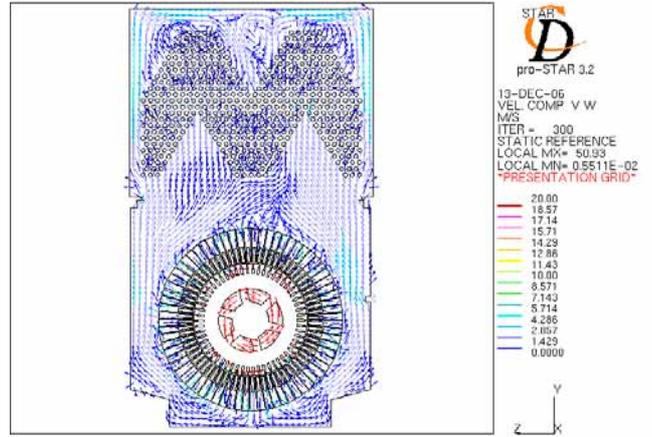


图 8 通风道截面流速分布图

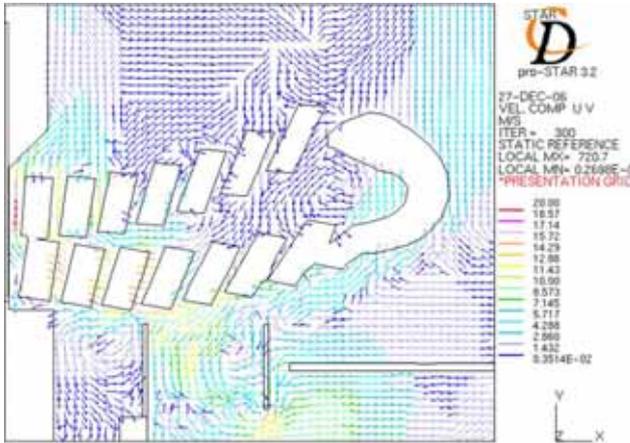


图 9 线圈端部流速分布图

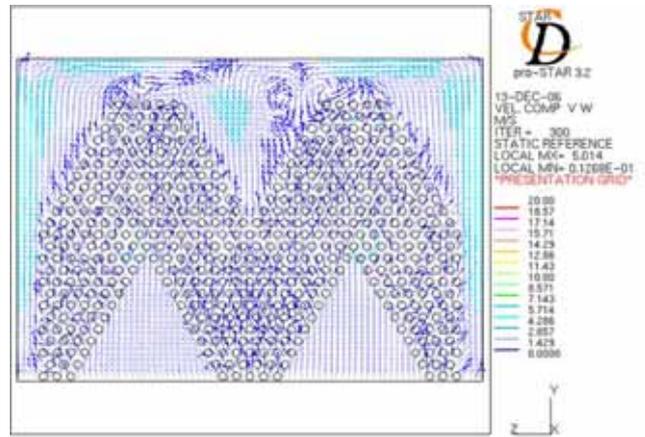


图 10 冷却器管间流速分布图

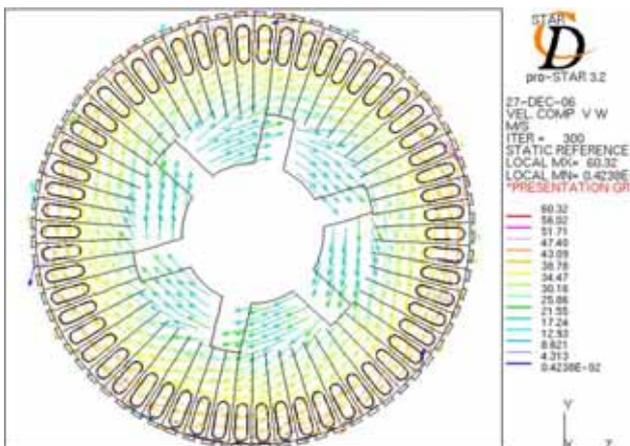


图 11 转子通风道流速分布图

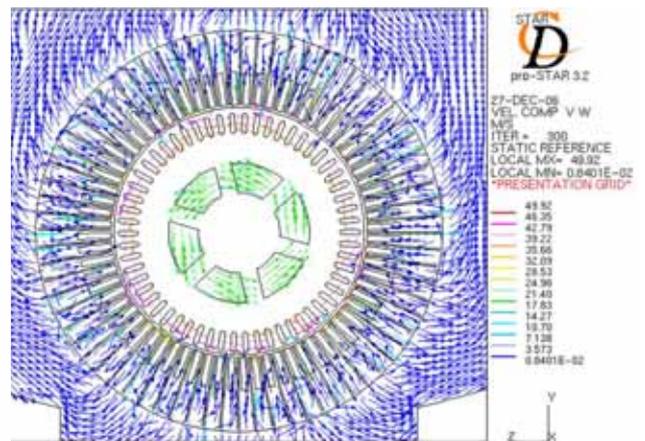


图 12 定子通风道流速分布图

3.2 压力场计算结果

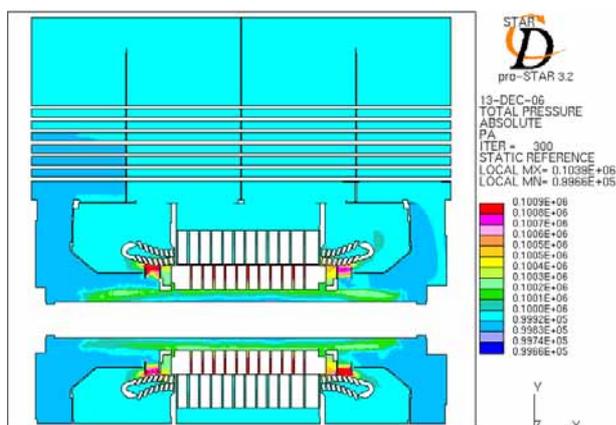


图 13 电机内部压力分布图

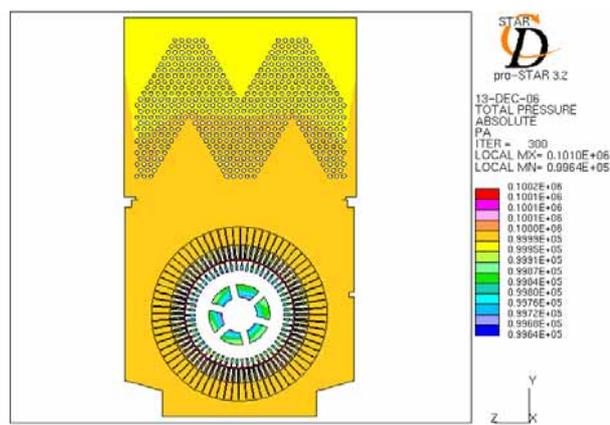


图 14 通风道截面压力分布图

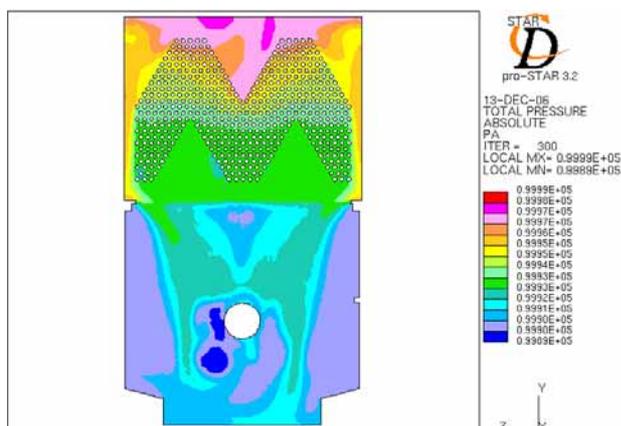


图 15 电机进风口截面压力分布图

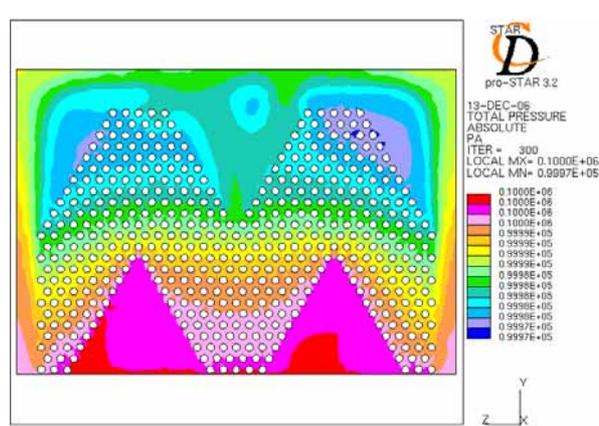


图 16 冷却器管间压力分布图

4 结论

通过分析发现，转子通风道内的风速较高，而定子通风道内的风速相对转子来说要低一些，而转子的损耗又低于定子，所以，转子的温度不高，主要考核定子温度，通风道散热面积较大，增加通风道的个数有利于定子铁心和绕组的散热；另外，定子绕组的下端面距离风扇较近，风速较高，散热效果较好，而定子绕组的上端面风速则很低，这是受挡风板形状及空间尺寸的影响，若将挡风板的形状改为与线圈端部风的走向相近，会更有利于端部的散热。

本文论证了 CFD 作为电机优化设计的补充手段是颇具价值的。它可以作为一种独立的工具来计算流体，传热甚至通风损耗。这种流体和传热计算的新方法可优化电机几何结构，得到均匀的温度曲线，避免温度峰值过高缩短电机寿命。

5 参考文献

- [1] 魏永田等编 《电机内热交换》机械工业出版社 1998、5
- [2] 景思睿、张鸣远编 《流体力学》西安交通大学出版社 2001、7