

# 基于 COMSOL 的非公路矿车发电机 双风机冷却匹配的分析与模拟

吴 荻, 申焱华

北京科技大学机械工程学院, 北京, 100083

**摘要:** 本文建立了非公路矿用自卸车大功率发电机的自通风冷却模型。考虑到矿用自卸车的空间布置限制, 发电机和后桥轮边电机的冷却风由同一个进风道提供。由于受发电机风机和后风道风机的共同作用, 冷却空气从前风道进入后分成两部分, 分别冷却发电机和后桥轮边电机。两个风机的风速匹配问题对发电机的冷却效果有直接影响。发电机的冷却问题是典型的多物理场耦合问题, 主要包含了流场和传热。本文基于COMSOL模拟了双风机匹配下发电机的冷却效果。

**关键词:** 非公路矿车, 发电机, 散热, 双风机匹配, COMSOL

**Abstract:** The paper describes a model of self-ventilated generator cooling on the off-road mine dump truck. Considering the space restrictions of mine dump truck, the cooling systems for the generator and the in-wheel motors of the rear axle share one air inlet duct. With the action of generator fan and rear duct fan, cooling air from the inlet duct will be divided into two parts to cool the generator and the in-wheel motors of the rear axle, respectively. Whether the air speeds of two fans match will have a great effect on the cooling performance. To design the cooling system of generator is a typical multiphysics problem, involving flow field, thermal field and so on. Here the cooling performance of the fans' conditions interaction is simulated by using COMSOL.

**Key words:** Off-road mine truck; Generator; Cooling; Air speed match of two fans; COMSOL

## 1 概述

电传动技术由于结构简单且传动效率高等优点, 在大型矿用自卸车上得到了越来越广泛的应用。随着发电机的功率不断增大, 散热问题成为车辆整体设计中的重要环节。发电机的热分析方法主要分为: 热参数法、等效热路法和有限元分析法。热参数法采用叠加原理计算各热源单独存在时被研究元件的温升之和, 多用于小型直流电机的计算。基于热网络理论的分析法在初步分析中很有效。但是为了获得更高的精度, 在建立热回路时需要建立更多的节点, 这大大增加了计算量【1】。同时在电机处于不同工况时, 计算节点的温度变化也是很困难的。计算机数值解法主要有两类, 一类是以等效热路法为基础的热网络法, 计算较为繁琐, 主要用于中小型旋转电机的校核计算; 另一类就是以计算传热学为基础的数值计算方法。【2】建立了3维电机模型, 利用有限元软件计算了热场和电磁场耦合时的情况。【3】中用有限

元方法模拟了封闭式风冷电机的温升，并在不同工况下和实验数据进行了对比。【4】中考虑了离心风机对电机的冷却效果，计算了电机内部的温度分布以及风机叶片处的流场分布。【5】中计算出表面散热系数代入温度场进行计算。尽管数值方法在计算中有更高的精度和适应性【6】，但是在应用中通常需要对复杂的电机形状进行简化以便减少计算量。

为了限制发电机内部的温升，常见的冷却方式有自然冷却、自通风冷却、强迫通风冷却以及液体冷却等。虽然液体冷却的效果普遍优于风冷，但是从结构的复杂性和实现的难易程度来看，风冷比液体冷却有着结构简单，实现容易和可靠性高等优点，同时为了便于发电机电扇的驱动，非公路车辆上的发电机主要采用强制通风冷却进行散热。发电机的冷却问题是典型的多物理场耦合问题，本文主要讨论了流场和传热。本文采用有限元软件COMSOL Multiphysics进行数值模拟，该软件中的共轭传热模块能较好的对流场和温度场进行耦合。通过模拟不同的入口风速条件，得到了发电机内部的不同冷却效果。

## 2 发电机冷却的数值模拟

本文建立了非公路电传动矿用自卸车的发电机模型。冷却风道示意图如图1，发电机的风机装在电机内部，而后部离心风机的作用是保证后桥轮边电机有足够的冷却风量。由前风道进来的冷却风由于两个风机的共同作用，一部分用来冷却发电机，而另一部分经过后风道冷却后桥轮边电机。

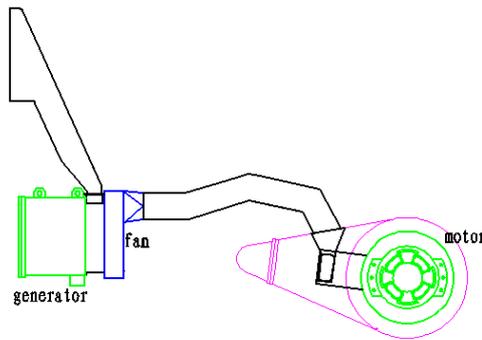


图1 冷却风道示意图

本文讨论的无刷励磁同步发电机的结构示意图如图2。副励磁机为旋转磁极式，发出的电流送到主励磁机的定子作为主励磁机的励磁电流，由于主励磁机为旋转电枢式，电枢发出的电流经整流后送至转子线圈从而达到对发电机励磁【7】。冷却风一部分从图中左侧的出口通向后桥冷却轮电机，另一部分通过发电机内部，从右侧的风机出风口排出。发电机的冷却过程属于强制对流换热，对流换热传输的热流量可以通过牛顿冷却公式求解，热流量可以表示为：

$$Q = \alpha F \Delta t \quad (1)$$

流体在固体壁面处的导热热通量和对流热通量相等。根据傅里叶定律和牛顿冷却公式：

$$q_x = q_{cond} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_w = q_{conv} = \alpha_x \Delta t \quad (2)$$

式中： $\alpha_x$ —— $x$ 位置处的局部对流换热系数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

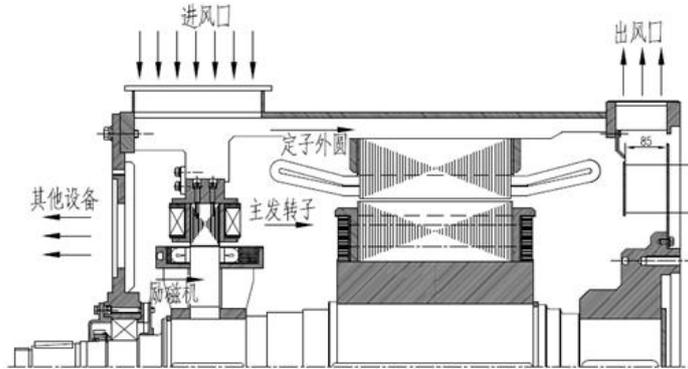


图2 发电机结构及通风示意图

励磁发电机在经过机电能量转换过程中产生的损耗将转变为热量，使发电机各部分温度升高，其损耗大致可分为铜损，铁损，电气附加损耗，机械损耗。其铜损为各绕组的铜耗之和：

$$P_{Cu} = \sum I_x^2 R_x \quad (3)$$

式中， $I_x$ ——绕组 $x$ 中的电流； $R_x$ ——换算到基准工作温度绕组 $x$ 的电阻。

在利用有限元方法模拟发电机的温升时，热源作为热分析模型的初始条件就是各部分功率损耗所产生的热，因此准确计算发电机的功率损失是建模的关键。这里主要考虑3个热源：定子绕组、定子铁心、转子。无刷励磁同步发电机的基本参数如表1所示。根据【8】所给电机各部分损耗的统计值，可确定发电机在额定工况运行时3个热源的发热量占总损耗的关系如表2。

表1 TFW3001-4发电机基本参数

额定功率/KW	额定效率	额定电压/V	定子外径/mm
1800	95%	1140	950
定子内径/mm	绝缘等级	冷却方式	定子绕组报警温度/ $^\circ C$
694	H/H	IC01	145

表2 发电机各部分损耗值

热源名称	定子绕组	定子铁心	转子
损耗比例	40%	32%	28%
热源/KW	36	28.8	25.2

根据该发电机的几何尺寸在CAD软件中建模。考虑到发电机结构的对称性，本文选择发电机的轴向横截面建立二维模型，导入COMSOL后如图3。

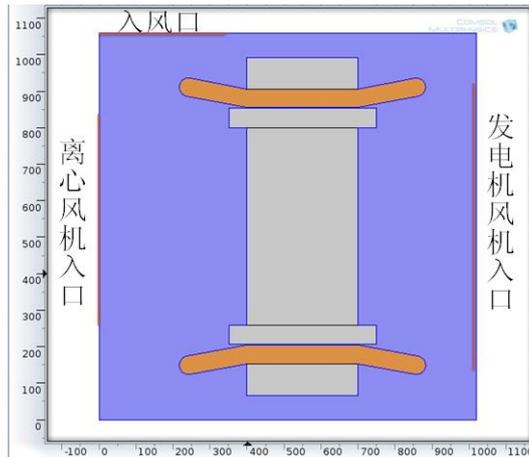


图3 发电机CAD轴向截面二维模型

冷却空气从前风道进入，一般为矿车工作环境的空气。假定空气特性为常温标准大气压下的值。空气、发电机定、转子的材料特性如表3。数值计算采用二维、稳态、常物性模型。入口条件为常温标准大气压条件下的开边界，两个出口分别为两个风机的入口速度。壁面均为恒温293.15K，无滑移。

表3 材料属性

	空气	绕组（铜线）	铁心
密度[kg/m <sup>3</sup> ]	1.293	870	7870
导热系[W/m*K]	0.023	400	76.2
常压热容[J/kg*K]	1003	385	440
动力粘度[Pa*s]	17.9e-6		
比热率	1		

计算网格由自由剖分三角形网络和边界层的自由剖分四边形网络构成，单元尺寸为标准。完整网络由11373个单元构成。网格划分如图4。

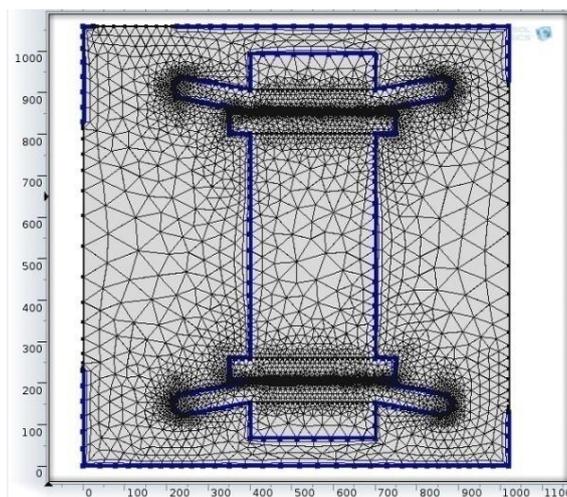


图4 网格划分

根据后桥轮边电机的技术要求，其通风量不低于4m<sup>3</sup>/s。通风量和风机入口截面积的比值得到最低入口速度10m/s。分别模拟发电机冷却风扇度入口速度为4m/s、6m/s、8m/s、10m/s

时的冷果效果。计算采用直接求解器PARDISO，因为其易于使用、鲁棒性强，适于处理小规模问题，高度非线性和多物理场问题。

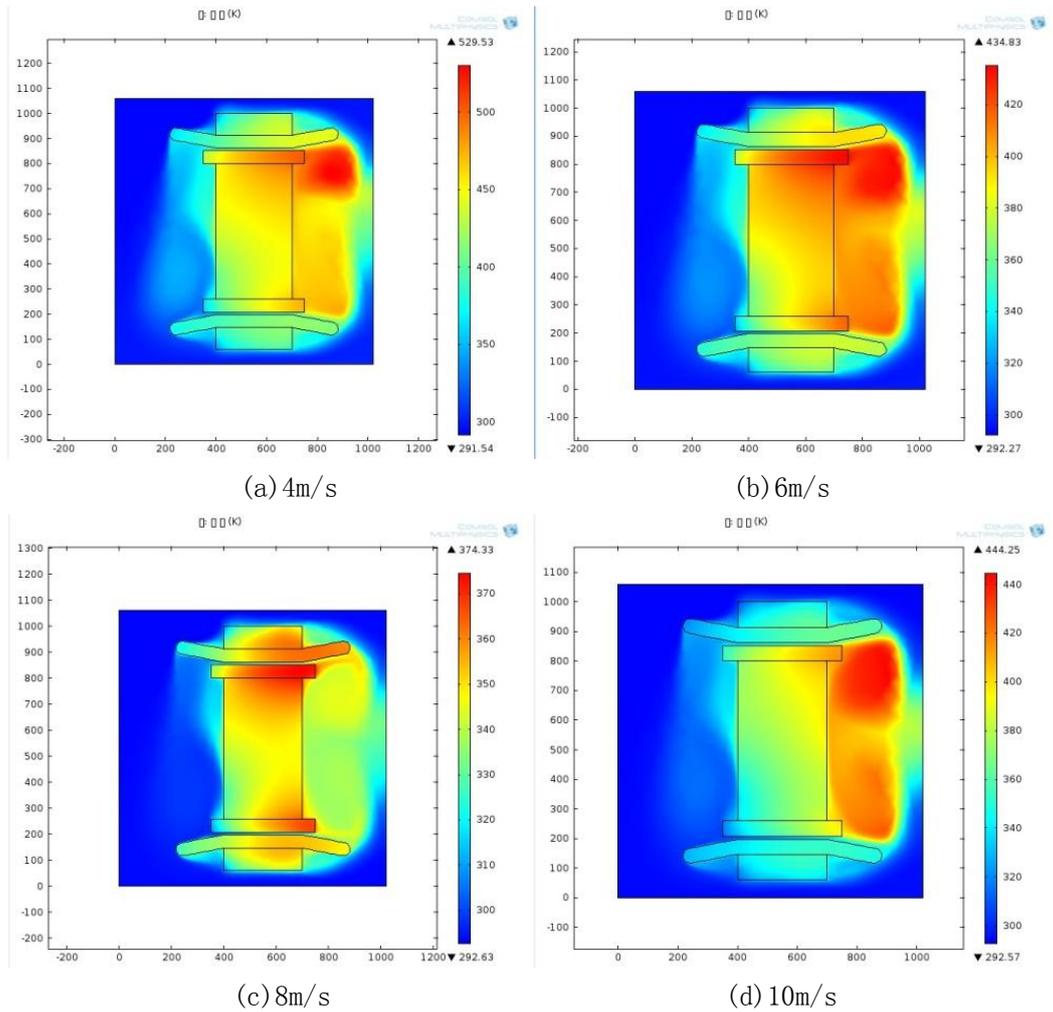


图5 发电机内部温度场

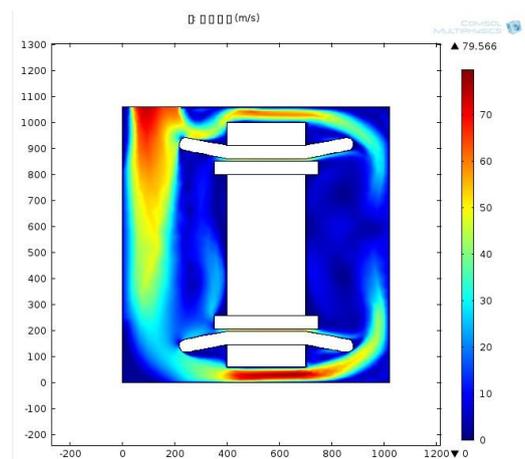


图6 8m/s时速度场

从模拟结果图5(c)中可以看出，当发电机风机入口速度为8m/s时，最高温度为374.3K，低于报警温度，发电机可以正常运行。结合图6的速度场示意图可以看出，发电机内部的冷却空气主要从定子和外壳之间流过，发电机内部风机一侧转子附近的流动性较差，这就导致

在这一侧会形成温度集中。

从图5(a)、(b)中可以看出,在发电机风机入口速度为4m/s和6m/s时,最高温度分别为529.5K和434.8K,均高于发电机418.15K的报警温度。这是由于速度较低时,通风量少,不能达到发电机的冷却要求。而在图5(d)中,当发电机风机入口速度继续增大到10m/s时,最高温度为444.3K,高于报警温度,且在风机入口处温度集中在四种情况中最明显。这是由于风速增大之后在出口处形成了较大的负压,转子处空气流动严重受阻,反而降低了冷却效果。故发电机风机的入口速度在8m/s时的冷却效果最好。

### 3 结论

随着大型矿用自卸车电传动技术的发展,大功率励磁发电机在矿车上得到了广泛的应用。发电机的冷却问题成为整体设计中的重要环节。本文建立了发电机在双风机作用下的冷却模型,利用COMSOL模拟了双风机不同条件对发电机冷却效果的影响。通过模拟结果给出了冷却效果较好时的风机入口速度,解决了非公路矿用自卸车上发电机冷却效果不佳的问题。

### 4 参考文献

- 【1】 覃新川,文宏刚,陆凌啸。“电机散热计算方法探讨”。2011中国电工技术学会学术年会论文集。
- 【2】 Krzysztof Komeza, Xose M. Lopez-Fernandez, Marcin Lefik. “Computer Modeling of 3D Transient Thermal Field Coupled with Electromagnetic Field in Three-phase Induction Motor on Load”. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2010, 29(4), 974-983.
- 【3】 Ying Huai, Roderick V.N. Melnik, Paul B. Thogersen. “Computational Analysis of Temperature Rise Phenomena in Electric Induction Motors”. Applied Thermal Engineering, 2003, 23, 779-795.
- 【4】 Chih-Chung Chang, Sy-Chi Kuo, Chen-Kang Huang, and Sih-Li Chen. “The Investigation of Motor Cooling Performance”. International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering, 2009,43-49.
- 【5】 李伟力,靳慧勇,丁树业,熊斌。“大型同步发电机定子多元流场与表面散热系数数值计算与分析”。中国电机工程学报,2005,25(23),138-143。
- 【6】 J.L. Romo, M.B. Adrian, Prediction of internal temperature in three-phase induction motors with electronic speed control, Electr. Power Syst. Res, 1998, 45, 91-99.
- 【7】 张苓。“正交谐波无刷励磁同步发电机原理及应用”。重型机械科技,2,2004。
- 【8】 江钟衍。《异步电机质量控制北京》。机械工业出版社,2008。