

高压高速电机通风与散热分析*

姚丙雷, 刘朋鹏, 王建辉, 韦福东

[上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

摘要: 针对 YKS 规格的高压高速电机单机容量高、局部温升大等特点, 以 1 台 YKS-560-2 3 000 kW 规格的高压高速电机为例, 依据电机实际尺寸, 建立了电机端部绕组及定转子模型。采用有限元法对流体场与温度场进行了仿真, 计算出电机运行时各个通风槽内冷却气体流动情况, 并对电机整体进行流固耦合分析, 得到高压电机端部绕组及定转子温度场分布。对仿真计算结果分析, 并与样机试验数据比较, 结果表明: 流体场和温度场耦合的方法能够准确地了解 YKS 电机各个通风槽内的气体流动情况及电机内局部温升分布。

关键词: 高压高速电机; 流体场; 温度场; 耦合分析

中图分类号: TM 301.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)08-0070-06

Ventilation and Heat Dissipation Analysis of High-Voltage and High-Speed Motor*

YAO Binglei, LIU Pengpeng, WANG Jianhui, WEI Fudong

[Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China]

Abstract: YKS series high-voltage and high-speed motor had the characteristics of high single unit capacity and large local temperature rise. A YKS-560-2 3 000 kW high-voltage and high-speed motor was taken as an example. According to the actual size of the motor, the motor end winding and stator-rotor models were established. The finite element method was used to simulate the fluid field and temperature field. The flow of cooling gas in each ventilation slot was calculated during motor operation. The fluid-solid coupling analysis of the whole motor was carried out to obtain the temperature field distribution of the end winding and stator of the high-voltage motor. The simulation results were analyzed and compared with the experimental data. The results showed that the method of coupling the fluid field and temperature field could accurately acquire the gas flow in each ventilation slot of the YKS motor and the local temperature rise distribution in the motor.

Key words: high-voltage and high-speed motor; fluid field; temperature field; coupling analysis

0 引言

随着工业发展的要求, 在特定的机座号内的高压高速电机单机容量逐渐变大。功率的提高使高压高速电机的电磁负荷较高, 单位体积高频损耗大, 转子高速旋转时产生的风摩损耗较大, 导致电机运行时温升较高。为了保证电机安全可靠的运行, 不仅需要考虑电机的电磁指标是否符合要

求, 还需要考虑电机的局部温升是否在设计允许的范围^[1-3]。

高压高速电机结构复杂, 且运行时伴随着电磁、流体和机械等物理场内部错综复杂的耦合关系^[4], 难以对电机局部温升进行准确的温度场计算。针对此问题, 国内外许多学者进行了大量研究。路义萍等^[5]通过数值模拟得到定子通风系统内流体流动速度的分布特点, 并着重分析了端部

* 基金项目: 2017 年工业转型升级(中国制造 2025)

作者简介: 姚丙雷(1976—), 男, 高级工程师, 研究方向为永磁电机。

刘朋鹏(1991—), 男, 硕士, 研究方向为电机设计与控制技术。

王建辉(1971—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机设计与控制技术。

绕组、压指、压圈周围及径向通风沟内流体流动情况。鄢鸿羽^[6]在流体场计算结果的基础上,分析了高压电机通风槽片对径向通风沟内流体流动的影响。Chen 等^[7]结合流体仿真研究了风扇对电机热性能的影响。温嘉斌等^[8-10]对高压电机温度场进行了大量研究,以单个通风槽分析了通风槽片对电机散热的影响。

YKS 规格的高压高速电机由于比同功率其他规格电机小一个机座号,散热面积更小,对通风散热的要求更高,所以有必要对其进行温升可靠性分析。本文以 1 台 YKS-560-2 3 000 kW 的高压高速电机为例,依据电机实际尺寸,建立了电机端部绕组及定转子模型,采用有限元法对流体场和温度场进行了仿真,计算出电机转子旋转时各个通风槽内冷却气体流动情况,并对电机整体进行流固耦合分析,得到高压电机端部绕组及定转子温度场分布结果。对仿真计算结果进行分析,并与样机试验数据比较,结果表明:流体场、温度场耦合的方法能够更加准确地了解高压高速电机局部温升情况,对电机设计和电机的安全可靠运行具有重要意义。

1 电机传热数学物理模型

YKS-560-2 电机冷却系统采用空水冷的冷却方式。其结构及风路示意图如图 1 所示。

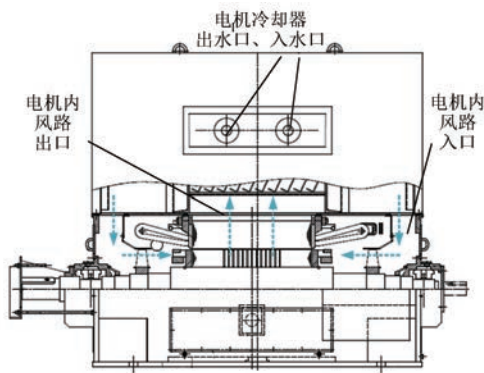


图 1 YKS-560-2 高压电机结构及风路示意图

定转子采用轴径向混合通风进行散热,电机内部风路不与外部接触,电机两端装有轴流风扇,利用该风扇的旋转产生强大的压力驱动内部风路流体循环流动,电机中部安装挡风板对电机内流体的流动方向进行约束,冷却气体由风扇产生的较大压强的作用流入至水冷冷却器中。图 1 中的

箭头表示内风路的流动方向。

YKS-560-2 电机具体参数如表 1 所示。

表 1 YKS-560-2 电机具体参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	3 000	额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
额定电压/kV	10	定子铁心个数	24
铁心长度/mm	714	定子通风道宽度/mm	6
机座号	560	转子铁心个数	12
极数	2	转子通风道宽度/mm	6
定子外径/mm	1 100	效率/%	96.6
定子内径/mm	570	定子槽数	54
转子外径/mm	558.6	转子槽数	46

根据表 1 参数建立电机模型。考虑到 560 高压高速电机中间挡风板的作用,电机流体轴向呈对称分布。为了简化仿真,对 560 高压高速电机 1/2 模型进行仿真。电机 1/2 模型如图 2 所示。

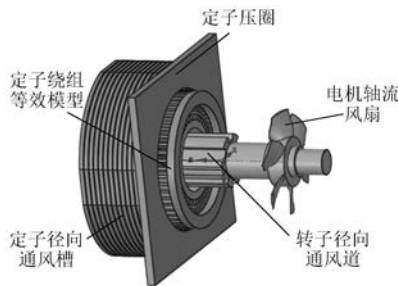


图 2 电机 1/2 模型

电机各部件具体损耗数值如表 2 所示。

表 2 电机部件具体损耗数值		W
损耗名称	损耗数值	
定子铜耗	28 518.3	
转子铜耗	7 903.6	
铁耗	26 470.0	
机械损耗	28 273.0	
杂散损耗	10 835.8	

高压高速电机运行时,转子高速旋转,通风槽内冷却气体受离心力和科里奥利力影响较大,并且流经气隙时冷却气体的速度和方向发生剧烈的变化,雷诺数很大,属于湍流状态。考虑到转子旋转效应,采用更适合于旋流计算的重整化群 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,提高了电机对流换热计算精度。

RNG k - ε 湍流方程式:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: ρ 、 u_i ——流体密度和速度;

α_k 、 α_ε ——与湍动能 k 和耗散率 ε 相关的普朗特因子倒数;

μ_{eff} ——湍流黏度;

G_k ——由层流速度梯度而产生的湍流动能;

G_b ——由浮力作用而产生的湍流动能;

Y_M ——在可压缩湍流中,过渡的扩散产生的波动;

S_k 、 S_ε ——用户定义的源项;

$C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ ——常量,湍流普朗特数。

2 电机流体场分析

2.1 电机端部流体场分析

在流体场分析中,电机内部风路为内循环封闭结构,水冷冷却器内部结构复杂且对高压电机内部流体分布影响不大,因此,将冷却器等效为电机恒风量入口。

根据 560 高压高速电机实际尺寸建立了流体仿真模型,主要包括定转子流体区域和端部风扇流体区域。由于电机结构复杂,薄长间隙较多,为了保证求解精度,需要剖分大量的单元网格,导致计算难度较大,对硬件要求也较高,而且,端部区域与薄长气隙之间尺寸相差大,剖分网格过度困难,计算结果会有较大偏差。考虑到 560 高压高速电机以上特点,仿真分析时将电机定转子区域和端部区域两部分单独分析计算,并把端部区域冷却气体出口作为定转子区域冷却气体入口。仿真模型简化后不会改变流体场的计算结果,而且两部分单独分析计算有效避免了网格过渡难、计算误差大的问题,同时减少了计算机的运行时间。图 3 所示为电机端部风扇流体区域模型。

根据图 3 给定的模型,利用流体仿真软件对

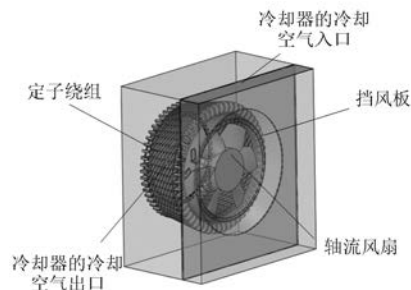


图 3 电机端部风扇流体区域模型

端部区域进行数值分析,仿真结果如图 4、图 5 所示。

图 4 为静止坐标系下风扇二维速度矢量图。冷却空气由入口经漏斗状挡风板进入风扇,轴流风扇转速为 3 000 r/min,由于风扇为轴流风扇,最大风速位于风扇边缘,与扇叶线速度基本相同,约为 92 m/s。

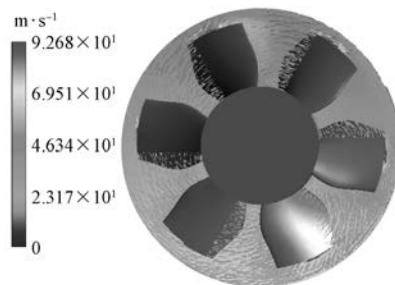


图 4 电机轴流风扇径向平面速度矢量图

图 5 为电机端部区域风压云图及静止坐标系下轴向平面速度矢量图。端部区域入风口在风扇

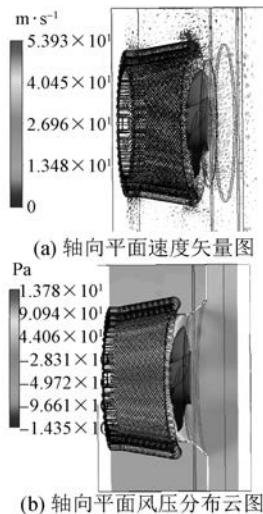


图 5 电机轴流风扇轴向平面速度矢量图和风压云图

的上端,因此轴流风扇旋转时上部冷却气体流速比下部稍大,扇叶处轴向风速约为 53 m/s。由于风扇在端部绕组内侧,绕组内侧风速远大于绕组外侧风速。由图 5(a)可知,端部绕组中部风量较小,两侧气隙较宽,风量较大。由图 5(b),可知,最大风压在轴流风扇左侧,为 1 378 Pa,最小风压在轴流风扇右侧入风口,为 -1 435 Pa,风压分布与流速分析一致。

2.2 电机定转子流体场分析

将端部流体区域出风口速度作为定转子流体区域的入风口速度进行数值分析计算。由于 560 高压高速电机定转子气隙较小,通风槽多且较复杂,因此在建模时对不必要倒角进行化简,并对结构较小的部分、速度变化较快的区域,部分网格适当加密。电机定转子 1/2 模型及流体域模型如图 6 所示。

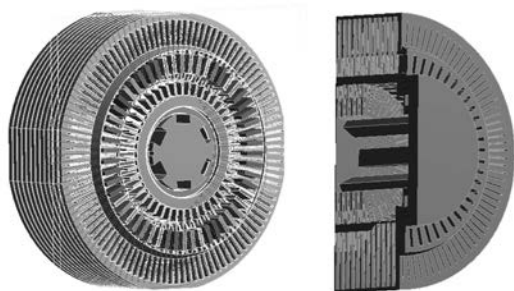


图 6 电机定转子 1/2 模型及流体域模型

按照图 6 的模型利用流体仿真软件对定转子区域进行数值分析。

图 7 所示为静止坐标系下定转子径向通风槽及气隙流体速度矢量图。

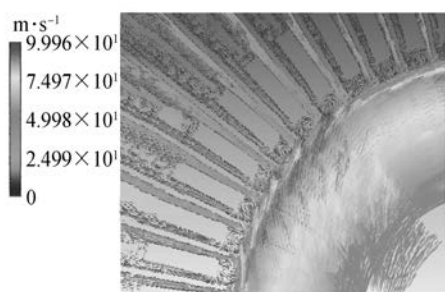


图 7 定转子径向通风槽及气隙流体速度矢量图

由图 7 可知,由于转子轴向通风道的分布不均匀,转子旋转时各个转子径向通风槽流速也不相同,与轴向通风道连通的径向通风槽流速最大,

约为 100 m/s。定转子气隙内冷却气体流动方向由转子侧切向迅速变成径向流入定子侧,并且流速也发生了巨大的变化,特别是在定子槽口处,冷却气体速度由 100 m/s 骤降至 30 m/s。

不同气隙处冷却气体进入通风槽流速不同,绕组两侧通风槽内冷却气体流量、流速也有较大差异。受定子齿槽及通风槽片的影响,定子槽口区域会有涡流现象,减弱了冷却气体的流动速度,有效冷却气体流量减少,电机散热效率降低。从图 7 还可以看到,定子通风槽片呈放射状排列,两槽片之间流通面积由气隙到机座逐渐变大,因此通风槽内冷却气体在流动过程中,流速由 30 m/s 逐渐降低到约 20 m/s。

将端部流体域仿真计算得到的出口风量作为电机内部流体域的进口风量,并将转子转速设置为 3 000 r/min,得到静止坐标系下电机定子各个通风槽流体速度矢量图,如图 8 所示。

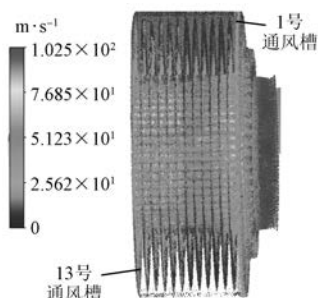


图 8 电机定子各个通风槽流体速度矢量图

由图 8 可知,1、13 号通风槽风速较大,约为 26 m/s,1 号通风槽风速较大是因为通风槽板较宽,13 号通风槽风速大是由于挡风板引流的作用。

图 9 所示为静止坐标系下电机转子径向通风槽流体速度矢量图。

从图 9 可以看出,转子通风槽板相当于离心

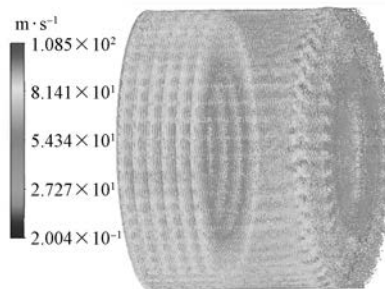


图 9 电机转子径向通风槽流体速度矢量图

式风扇扇叶,通风槽内风速远大于轴向风道风速,且由于端部通风槽板较宽,风速更大,约为 108 m/s,接近于转子外圆线速度。

图 10 所示为静止坐标系下电机轴向速度云图。

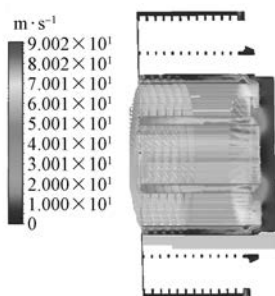


图 10 电机轴向速度云图

由图 10 可以看出,流体由转子轴向通风道经转子通风槽到气隙再到定子通风槽的速度变化情况,风速分布与图 7~图 9 分析一致,其中电机气隙处风速最大,约为 90 m/s。

3 电机温度场分析

在温度场分析中,采用流固耦合传热分析方法,散热系数由有限元计算迭代决定,以提高端部绕组及定转子温度场计算的准确性。

3.1 电机端部温度分析

端部绕组的温升分布与冷却气体的流动密切相关。图 11 所示为电机端部绕组绝对温度云图。

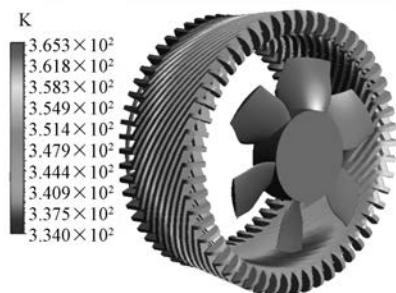


图 11 电机端部绕组绝对温度云图

由图 11 可以看出,由于轴流风扇作用,风速较大处温度较低,所以端部绕组内侧温度明显低于外侧,扇叶吹拂处温度最低,绕组温度最高处为远风扇端,约为 92 ℃。温度分布与端部区域流体分析一致,温升符合设计要求。

3.2 电机定转子温度分析

假设定子铁心损耗与绕组铜耗分布均匀,通

过流固耦合仿真可得定子与绕组绝对温度分布云图,结果如图 12 所示。

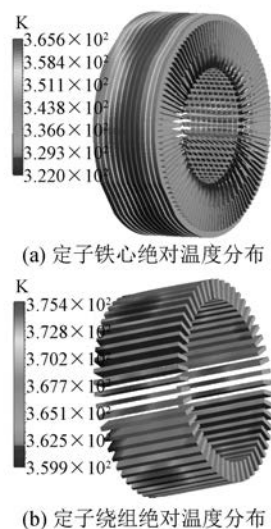


图 12 定子铁心及定子绕组绝对温度分布云图

从图 12(a) 可以看出,由硅钢片叠成的定子铁心温度分布不均匀,两侧通风槽风速较大,温度比中部铁心低;由于 6 个轴向风道吹拂作用,定子轴向温升分布也不均匀。定子绕组由于有槽绝缘且绕组的发热量较大,由图 12(b) 可以看出,绕组平均温升明显大于定子,最高温度为 102 ℃。

图 13 所示为电机转子绝对温度分布云图。其图 13 中最高温度为 44 ℃,转子整体温升较低。通过与图 12 对比可知,转子部分的散热效果好于定子部分,最高温度比定子部分的低。原因是:(1) 转子导条铜耗较低且与转子铁心紧密接触,导热效果良好。(2) 转子采用径向通风槽设计,与离心风扇原理类似,电机运行时加快转子通风槽气体流动,有效降低了转子温度。

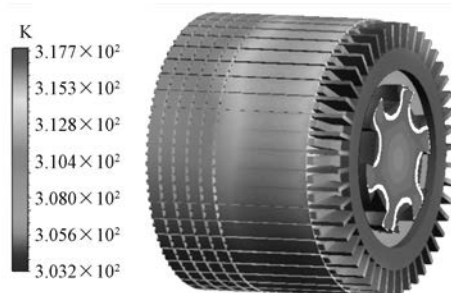


图 13 电机转子绝对温度分布云图

图 14 所示为电机径向轴向绝对温度分布云图

图。由图 14 可以看出,轴向风道与气隙处为冷却气体入口,温度较低,为 25 ℃,冷却气体在从转子幅板流向定子背部的过程中,温度逐渐升高,总体来讲,冷却空气的温升较低。定子绕组由于有 2.1 mm 厚云母带且发热量较大,温升最高。

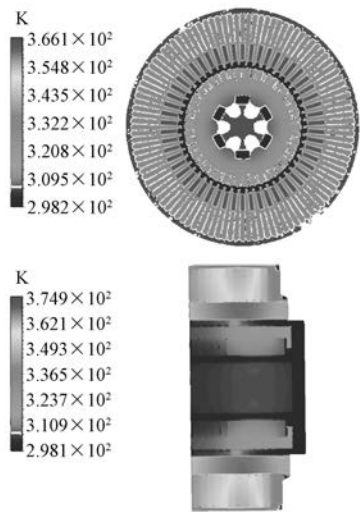


图 14 电机径向轴向绝对温度分布云图

由图 14 可以看出,转子、气隙、定子、绕组温度分布情况,与轴向流体分析速度云图分析基本一致。

4 样机验证

为了验证电机流固耦合模型的准确性,按照表 1 电机参数设计了 1 台 YKS-560 样机。并将本文的仿真温升与样机试验温升进行对比分析,结果如表 3 所示。

表 3 样机仿真和试验结果

仿真参数名称	参数值	试验参数名称	参数值
绕组仿真温升/K	77.4	绕组测试温升/K	76.8
转轴仿真温度/℃	40.3	轴承测试温度/℃	43.6

试验测试结果给出了绕组温升及轴承温度,绕组温升与仿真结果基本一致,而轴承未进行温度场仿真,本文给出了转轴温度对比分析,轴承测试温度为 43.6 ℃,略高于转轴仿真值,说明仿真结果合理。试验结果证明了仿真方法的正确性。

5 结 语

针对 YKS-560-2 3 000 kW 高压高速电机单机容量高、结构复杂、局部温升大等特点,研究了高压高速电机端部区域、定转子区域气体的流动情况,建立了定转子系统流固耦合传热模型。分析表明采用流体场、温度场耦合的算法可以准确地分析高压高速电机内局部温升情况,为行业设计人员设计该类型电机或更高单机容量的电机提供了依据,提高了高压高速电机设计的可靠性及准确性。

【参考文献】

[1] 周封,熊斌,李伟力,等.大型电机定子三维流体场计算及其对温度场分布的影响[J].中国电机工程学报,2005,25(24): 128.

[2] 陈起旭,王云洪,杨来顺,等.铜转子三相异步电动机温度场流场耦合分析[J].电机与控制应用,2017,44(10): 77.

[3] 贺文凯,顾德军,王鸿鹄.两种不同通风结构对高压电机性能的影响[J].电机与控制应用,2014,41(6): 36.

[4] 陈起旭,周阳,杨来顺,等.大功率盘式交流永磁同步电机温度场流场耦合分析[J].电机与控制应用,2017,44(4): 20.

[5] 路义萍,丰帆,孙明琦,等.同步电机定子与气隙流场数值计算与分析[J].电机与控制学报,2011,15(8): 47.

[6] 鄢鸿羽.中型高压异步电机流体流动与传热计算分析[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2011.

[7] CHEN Y, CHEN C, DONG Q. CFD modeling for motor fan system [C] // IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2003.

[8] 温嘉斌,郑军,于喜伟.YKK 中型高压异步电动机换热分析与冷却器优化[J].电机与控制学报,2015,19(9): 33.

[9] 温嘉斌,刘艳翠,姜天一,等.中型高压电机内风扇流体分析与温升计算[J].电机与控制学报,2018,22(4): 33.

[10] 侯健.YKK 系列中型高压电机流体场与温度场的计算分析[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.

收稿日期: 2019-04-26