

大功率九相变频异步电机通风系统热流耦合仿真分析

王建乔, 赵 强

(卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473008)

摘 要: 为了有效解决大功率低速异步电机通风散热难题, 基于热流耦合仿真分析计算方法, 以 1 台 2 800 kW、8 极九相变频异步电机为例, 系统分析了顶吸式强迫风冷电机内定子齿压板宽度距离对电机内风量分配、绕组温升分布以及内部风阻特性的影响, 并筛选了匹配方案; 同时, 对比分析了九相减薄绝缘结构与三相高压绝缘结构的换热性能。最后, 进行了电机的温升试验测试, 温度场计算值与试验结果基本吻合, 验证了基于热流耦合仿真分析计算的准确性和有效性。

关键词: 九相变频异步电机; 热流耦合; 绝缘结构; 定子齿压板

中图分类号: TM 302 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)07-0078-06

Simulation Analysis of Heat Flow Coupling in the Ventilation System of High-Power Nine-Phase Variable Frequency Asynchronous Motor

WANG Jianqiao, ZHAO Qiang

(Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473008, China)

Abstract: In order to solve the ventilation and heat dissipation problem of high-power and low-speed asynchronous motor effectively, based on the heat flow coupling simulation analysis and calculation method, a 2 800 kW and 8-pole nine-phase asynchronous motor was taken as an example to analyze the distribution of air and temperature rise distribution in the motor with the width distance of the stator tooth platen of the top suction forced air-cooled motor. As well as the influence of internal wind resistance characteristics, the matching scheme was screened. At the same time, the heat transfer characteristics of the nine-phase subtracted thin insulating structure and the three-phase high voltage insulation structure were compared and analyzed. Finally, the motor temperature rise experiment test was carried out, the temperature field calculation results were in good agreement with the test results, verifying the analysis and calculation of the accuracy and effectiveness of the simulation based on heat flow coupling.

Key words: nine-phase variable frequency asynchronous motor; heat flow coupling; insulation structure; stator tooth platen

0 引 言

随着市场经济的发展和自动化、智能化程度的提高, 采用大功率变频器对泵类负载进行速度控制, 不但对改进工艺、提高产品质量有好处, 又满足节能和设备经济运行的要求, 是可持续发展的必然趋势。有别于当前较普遍采用的高压变频

系统, 多相传动系统更便于采用低压开关器件实现大功率传动, 可减小电机的绝缘成本, 简化生产工艺, 提高系统可靠性。

目前关于电机温度场计算的文献较多, 一些学者在流体力学理论、有限元体积^[1-2]及有限元方法^[3]的基础上对大型发电机内流场进行了研究, 但是大多均采用了有限元法对局部温度场进

作者简介: 王建乔(1963—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气工程。

赵 强(1982—), 男, 硕士, 研究方向为电机通风散热的设计及仿真计算。

行分析,在以往确定径向通风沟内流体流速时,都假定齿部及轭部流体流速分别恒定^[4],与发电机定子径向通风沟内的流体的实际分布情况不相吻合。丁树业^[5]对径向通风沟内流体流动特性变化对定子温度场的影响进行了数值分析,得到了径向通风沟入口处的流体流动速度以及流体流动形态变化对通风沟内流体流动及传热特性的影响。文献[6]基于有限体积法对发电机转子风道结构与流量分布的关系进行分析,为发电机转子风道优化设计提供理论参考。但是,能应用于实际工程中且是对整机计算的温度场计算方法较少。准确的温度场计算一直是电机设计的重要内容,是由于电机内各部位的损耗分布不均匀会造成电机内温度场分布不均匀。电机内部热源分布的确定,是进行电机温度场及温升计算的基础,也是决定通风冷却系统优化设计的前提条件。本文以 1 台大功率九相变频异步电动机为研究对象,进行不同通风系统的设计方案对比,采用流动和传热耦合计算的方法对电机定、转子的温度场进行数值模拟研究。

1 设计方案

1.1 电机基本参数

用于风机类负载的多相感应电动机,与多相变频器配套使用,所设计的电机能配合多相变频器高效、稳定运行。电机主要基本参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	2 800
额定相电压/V	660
相数	9
额定电流/A	550
额定频率/Hz	50
变频范围/Hz	11.5~50
额定转速/(r·min ⁻¹)	745
效率/%	95
绝缘等级	F 级
冷却方式	IC666
运行方式	S1

1.2 电机通风系统冷却设计

为了提高电机功率密度,其系统发热与冷却

问题必须引起设计者的关注。电机通风系统是一个复杂的气体动力和传热系统,良好的电机通风系统,可以合理地分配电机内冷却介质流量,降低通风损耗,使电机的发热部件较好地得到冷却。掌握电机内的温度分布情况,可以保证在设计阶段及时优化电机设计方案。

本次研制的九相变频异步电动机不仅极数多、定子铁心较长、通风道数量多,而且存在风阻大、风扇压头低、选型比较困难等问题。常见的单向风路结构采用离心风扇,缺点是风量分配不均匀、局部温升过高,风阻大风扇过大不稳定;而对称风路采用轴流风扇缺点是风压低、温升高,为此考虑公司先前已有的成熟案例,在冷却器里面做一些优化工作,通过增加强迫风机,对其定子铁心部分进行抽风设计,采用这样的顶吸式风路结构依靠冷却器内风扇作用把铁心部分热风快速吸到冷却器进行冷却,降低循环气体温度,如此循环往复。该现有结构形式可以不采用内风扇,缩短了电机长度,增强了大功率电机结构运行的可靠性。

通风系统依靠冷却器强迫风机作用,和转子自身旋转作用驱动冷却气体在电机内部循环流动,热空气经流入冷却器管道中的循环水冷却降温,如此循环往复,达到内部通风冷却的目的。电机通风结构示意图如图 1 所示。

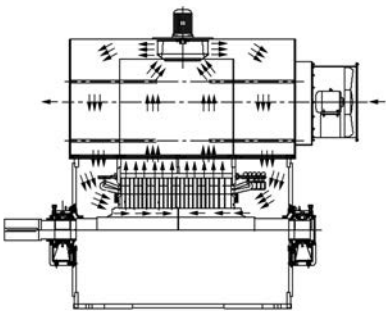


图 1 电机通风系统示意图

2 数值模型的建立

根据电机的通风结构,建立反映工程问题的数学模型,做出基本假设,进行仿真模拟。

2.1 数学模型

在标准大气压下,电机内流体的流动满足质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。相应的控制方程如下:

质量守恒方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u, v, w —— x, y, z 方向的速度分量。

动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u\omega)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v\omega)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega \omega)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

式中: ρ ——流体密度;

μ ——动力粘度;

p ——流体压力。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (5)$$

式中: c_p ——比热容;

T ——温度;

k ——流体的传热系数;

S_T ——流体的内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分,有时简称为黏性耗散项。

2.2 基本假设

根据电机的结构特征及电机通风的特点,做出如下假设:

(1) 电机内部流体的雷诺数很大 ($Re > 2\ 300$), 故采用湍流模型对电机内部流场进行求解;

(2) 电机内部流体域中,流体流速远小于声速,即马赫数很小,故把流体作为不可压缩流体处理;

(3) 忽略通风道内流体的浮力和重力;

(4) 由于电机的对称性和周期性,计算可以简化成只计算半个轴向长度周向的 1/18 有效部分结构;

(5) 研究电机内部流体流速的稳定状态,即定常流动,控制方程中不含有时间项;

(6) 槽内多匝绕组作为一个整体建模,槽绝缘和定子铁心接触紧密;

(7) 假定槽楔近似与槽同宽;

(8) 假定电机内各部件紧密接触,无接触热阻。

2.3 物理模型

根据电机通风结构特点和基本假设,不考虑冷却器结构部分,通风冷却系统的电机结构基本对称,定转子部分存在周期性,取电机轴向的 1/2,周向的 1/18 作为流体与温度场求解的物理模型。所建模型为电机通风散热流体域与固体域。求解域物理模型如图 2 所示。求解域网格划分如图 3 所示。

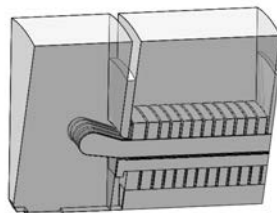


图 2 求解域物理模型



图 3 求解域网格划分图

2.4 边界条件

根据电机内风路结构特点和冷却器选型参数,电机流体场与温度场耦合求解边界条件设置为:质量流量进口,压力出口,对称边界条件,周期边界条件,无滑移边界和旋转区域。边界条件设置示意图如图 4 所示。

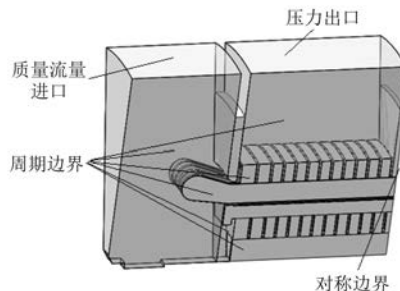


图 4 边界条件设置示意图

拟采用 5 种几何结构,以研究定子齿压板宽度距离对电机内风量分配、绕组温升分布及内部风阻特性的影响。具体方案如表 2 所示。

表 2 电机不同定子齿压板宽度方案

方案	齿压板 宽度/mm	质量进口/ (kg·s ⁻¹)	压力出口/ Pa	进口温度/ ℃
方案 1	16	2.4	0	40
方案 2	12	2.4	0	40
方案 3	8	2.4	0	40
方案 4	4	2.4	0	40
方案 5	0	2.4	0	40

3 仿真结果及分析

通过对九相电机建立的物理模型进行模拟计算,得到 5 种不同方案下的定子各径向通风道风量分配图及电机绕组温升分布图,如图 5 所示。



图 5 定子各径向风道位置编号及定子绕组线圈温度取样点位置编号示意图

如图 5 所示,编号 A0 代表径向风道齿压板风道位置,A1~A12 依次为定子各径向风道位置;编号 1 代表线圈端部位置,2 代表线圈直线部位位置,3~15 依次代表线圈轴向等间隔位置。定子各径向通风道风量分布图如图 6 所示。

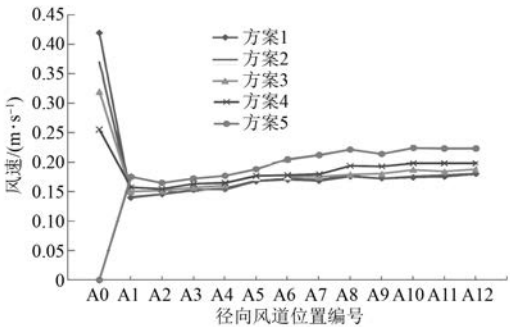


图 6 定子各径向通风道风量分布图

由图 6 可以看出,定子齿压板宽度对电机内风路风量的分配非常敏感,齿压板风道 A0 风量普遍较大,定子通风道 A1~A12 风量分配比较均

匀,且靠近定子铁心中心部位风量逐渐增大;随着定子齿压板宽度尺寸的减少方案 1~方案 4,齿压板风道 A0 风量逐渐减少,而定子通风道 A1~A12 风量分配逐渐增大,全封闭时,定子通风道 A1~A12 风量分配达到最大。电机绕组线圈温升分布图如图 7 所示。

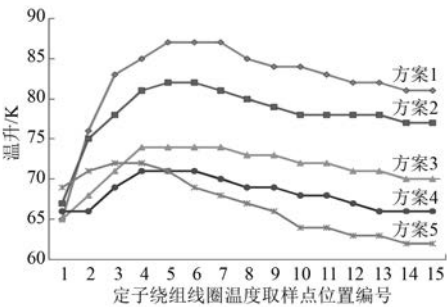


图 7 电机绕组线圈温升分布图

由图 7 可以看出,线圈温升呈斜鞍形分布,两端温度低,线圈温度取样点 4、5、6 位置处温升最高,靠近定子铁心中心部位温升逐渐降低。方案 1 和方案 2 线圈局部温升高于 80 K,方案 3、方案 4 和方案 5 电机线圈温升普遍低于 80 K,具有一定的温升设计余量。从图 6 和图 7 对比分析可以看出,风量高的部位温升低,风量低的部分温升高,可见合理控制风量对调节局部温升具有重要作用。

电机的通风冷却系统,不仅要求电机内部具有合理风量分配和温度分布,而且要充分考虑电机内部的风阻特性。电机内部风阻过大,会导致较高的机械损耗,降低电机效率,影响电机的稳定性,故必须对电机的风阻特性进行综合考虑。

表 3 电机不同方案温升和风阻数据表

	风量/(m ³ ·s ⁻¹)	温升/K	风阻/Pa
方案 1	2.4	82	217
方案 2	2.4	78	236
方案 3	2.4	71	289
方案 4	2.4	68	436
方案 5	2.4	66	670

由电机内部近似风阻公式 $P=RQ^2$ 可以得到 5 种方案的风阻系数。经计算可得到各方案的风阻曲线公式为

方案 1: $P=37 Q^2$

方案 2: $P=41 Q^2$

方案 3: $P=50 Q^2$

方案 4: $P=76 Q^2$

方案 5: $P=116 Q^2$

绘制电机各方案内风路风阻曲线如图 8 所示。

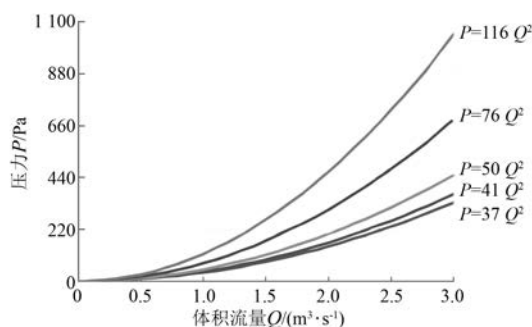


图 8 电机各方案内风路风阻曲线图

由图 8 可以看出,方案 1、方案 2 和方案 3 电机内风路风阻系数较小,方案 4 和方案 5 电机内风路风阻系数较大,风阻损耗很大。

电机内风路风阻与风扇匹配曲线如图 9 所示。

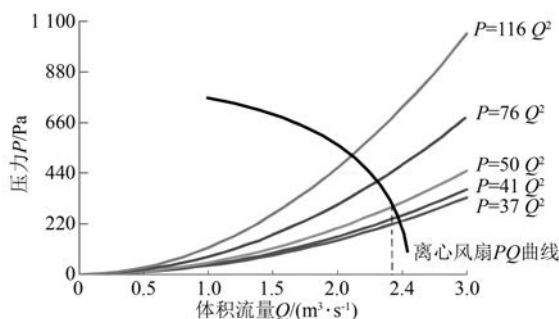


图 9 电机内风路风阻与风扇匹配曲线图

由图 9 可以看出:方案 3 与离心风扇匹配交于设计流量点 $Q=2.4 \text{ m}^3/\text{s}$,温升 71 K,符合电机温升要求;方案 1 和方案 2 的工况点均高于设计流量点。由图 7 可知,其电机温升余量不大,电机内部温度分布不均匀,线圈内部温差高于 20 K,局部温升过高,影响电机的寿命和安全;方案 4 和方案 5 的工况点均小于设计流量点,内部阻力迅速增大,不利于冷却器风扇的选型,易引起电机机械耗增加,降低电机效率。

综上所述,电机设计方案 2,其电机内部风量分配合理,温度分布均匀,且风阻较低,完全满足

了电机通风系统的设计要求。

对于高功率密度多极数变频电机,需充分考虑电机绕组的散热问题。在相同通风条件下,采用多相减薄绝缘结构有利于降低电机温升。文中通过对九相电机和三相电机方案进行对比分析,研究绝缘结构对电机绕组散热性能的影响。

三相电机采用中压电机的绝缘规范要求,九相电机采用低压电机的绝缘规范要求,线圈绝缘结构对比如图 10 所示。

由图 10 可以看出,三相电机槽绝缘结构内有效导体面积和绝缘面积比值为 81.1%,九相电机槽绝缘结构内有效导体面积和绝缘面积比值为 186.8%,九相电机定子槽口利用率提高了 45%。

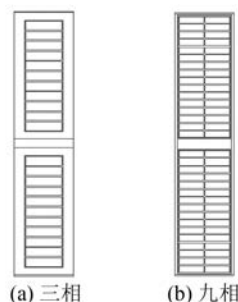


图 10 定子线圈槽结构示意图

在相同边界条件下,通过对三相和九相电机槽绝缘结构的温度场仿真分析,由图 11 可以看出,九相绝缘结构温度分布明显优于三相绝缘结构,九相线圈温升为 73 K,三相线圈温升为 93 K,低于三相线圈温升 20 K,且九相绝缘结构导热层导热快,温度梯度小,线圈温度散热效果好,因此,采用九相减薄绝缘结构线圈,可以有效地提升电机的功率密度。

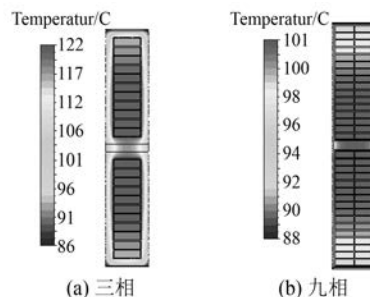


图 11 定子线圈温度分布云图

4 温升试验

电机的温升试验测试平台如图 12 所示。该

平台中采用变频驱动系统控制,通过变频软启动及变频调速控制,在电机绕组内部埋置 PT100 温度传感器监测。



图 12 电机的温升试验测试平台

表 4 所示为电机转速为 740 r/min 时,功率分别为 2 400 kW 和 2 800 kW 运行时绕组温升试验值与仿真计算值。

表 4 仿真计算值与试验结果的比较

运行工况	定子绕组温升/K	
	试验值	仿真值
2 400 kW	54	52
2 800 kW	73	71

由表 4 可知,电机在额定转速下,功率为 2 400 kW 和 2 800 kW 运行时,绕组温升的试验值和计算值基本吻合,验证了热流耦合仿真分析方法的准确性。

5 结 语

(1) 大功率低速异步变频电机建议在冷却器顶部加离心风扇,采用顶吸式强迫通风冷却系统,可有效地解决功率密度高、内部风阻大的问题。

(上接第 77 页)

制电路优化对短路进行控制,有效地防止了短路造成系统停机、开路等不必要的损坏维修。

6 结 语

本文主要研究了燃料电池新能源汽车专用直流变换器问题,并以电动汽车动力系统需求为目标,选择新一代碳化硅功率半导体器件设计了一款燃料电池专用高效变换器。该变换器具有高耐压比、高效率、高可靠的特点,适用于 30 kW 燃料电池汽车。通过对变换器的拓扑结构的优化、效率的提升及控制方法改进等方面的研究测试,证明该变换器可实现燃料电池的稳定输出运行,有

(2) 电机定子齿压板宽度参数是电机内风路风量分配、温升分布和风阻特性的敏感因素。通过调整宽度尺寸,探索了风量、温升及风阻的内在规律,为该机组通风系统的设计提供了重要依据。

(3) 通过对三相和九相电机槽绝缘的结构分析和温度场仿真计算,采用九相减薄绝缘结构线圈,可有效地提升电机的功率密度。

(4) 电机在额定转速下,功率为 2 400 kW 和 2 800 kW 运行时,绕组温升的试验值和计算值基本吻合,说明了热流耦合仿真分析方法的可行性。

【参考文献】

[1] DING S Y, LIU H R, SUN Z Q, et al. Research of fluid flow characteristic inside radial ventilation duct for large generator [C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010: 93-98.

[2] 丁树业, 孙兆琼, 姜楠, 等. 大功率双馈风力发电机内部流变特性数值仿真 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(4): 28-34.

[3] RAJAGOAL M S. Finite element analysis of radial cooled rotating electrical machines [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 1999, 9(1): 18-38.

[4] 廖毅刚, 侯小全. 全空冷汽轮发电机通风冷却研究 [J]. 东方电机, 2007(5): 1-12.

[5] 丁树叶. 复杂结构内流体流动与传热特性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008.

[6] 路义萍, 郑国丽, 李俊亭, 等. 空内冷汽轮发电机的转子多路通风均匀性 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 99-104.

收稿日期: 2018 -06 -15

效保护燃料电池,从而进一步延长燃料电池寿命,防止损坏燃料电池使其性能降低。

【参考文献】

[1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[2] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[3] ROHM Co., Ltd. SiC 功率模块的基本使用方法 [G]. 日本: 罗姆半导体集团, 2015.

[4] 全睿. 燃料电池发动机故障诊断研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.

收稿日期: 2018 -03 -05