

真空干泵用屏蔽电机温度场仿真分析与试验^{*}

毕晓舜¹, 安跃军¹, 杨维国¹, 张志恒¹, 毕德龙², 邓文字³, 齐丽君³

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 中国科学院沈阳科学仪器股份有限公司真空干泵事业部, 辽宁 沈阳 110179;

3. 沈阳中北通磁科技股份有限公司研发中心, 辽宁 沈阳 110179)

摘要: 针对真空干泵用屏蔽电机在额定运行过程中温升过高导致绝缘老化, 影响机组运行安全的问题, 对 1 台 4.5 kW 真空干泵用水冷式屏蔽电机的水冷结构进行了设计, 并进行了温度场仿真分析和试验。利用机械软件建立了屏蔽电机三维模型, 借助有限元分析软件建立屏蔽电机温度场计算的仿真模型, 设置热源激励和边界条件, 获得了电机内各部件的温度场分布规律, 并分析了冷却水流量、水道宽度、水道数及冷却水温对电机温升的影响; 搭建试验平台进行温升试验, 获得了从冷态起到温升稳定过程中各部位温度, 绘制温度随时间变化特征曲线。温度场分析与试验结果表明该电机设计合理, 为后续的真空泵用屏蔽电机温度场分析及冷却系统的选择提供了一定的参考依据。

关键词: 屏蔽电机; 真空干泵; 有限元分析; 温度场

中图分类号: TM 358 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)05-0064-06

doi: 10.12177/emca.2020.015

Simulation and Experiment of Temperature Field of Canned Motor for Vacuum Dry Pump^{*}

BI Xiaoshun¹, AN Yuejun¹, YANG Weiguo¹, ZHANG Zhiheng¹,

BI Delong², DENG Wenyu³, QI Lijun³

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Vacuum Dry Pump Business Division, SKY Technology Development Co., Ltd.,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110179, China;

3. Research and Development Centre, Shenyang General Magnet Technology Co., Ltd.,
Shenyang 110179, China)

Abstract: During the rated operation of canned motor for vacuum dry pump, insulation aging may occur when the temperature rise is too high, which threatens the operation safety of the vacuum dry pump. Aiming at this problem, the water-cooled structure of a 4.5 kW canned motor for vacuum dry pump is designed, and the temperature field simulation analysis and experiment are carried out. A three-dimensional model of the canned motor is established by using mechanical software, and a simulation model for calculating the temperature field of the canned motor is established by using finite element analysis software. By setting the thermal source and boundary conditions, the temperature field distribution in each part of the motor is obtained. An experimental platform is set up to carry out the temperature rise test, and the characteristic curves of temperature changing with time are obtained during the start process in cold condition to stable process after temperature rise. Combined with the temperature field analysis and experimental results, it shows that the internal temperature of the motor meets the thermal design requirements. This

收稿日期: 2020-02-20; 收到修改稿日期: 2020-03-23

^{*} 基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX02201005-002); 辽宁省科技重大专项项目(2019JH1/10100016)

作者简介: 毕晓舜(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机及其控制。

research has a certain guiding significance for the subsequent investigation of temperature field and the design of cooling system of the canned motor for vacuum dry pump.

Key words: canned motor; vacuum dry pump; finite element analysis; temperature field

0 引言

真空技术与人们的生活紧密相关,在航空领域、半导体制备、医疗器械、电真空技术甚至食品包装等方向具有卓越的表现^[1]。随着科技的飞速发展,真空技术已开始向传统工业迈进。真空干泵以其清洁无油、结构简单紧凑、可靠性高、振动噪声小等优点满足了人们对真空环境的迫切需求^[2]。

在工业生产中,通常将真空泵与电机设计成一体结构,这样有利于真空系统中真空度的保证。在定子内部加入屏蔽套,将定、转子隔离开,防止大气或者其他物质进入真空腔体污染电机。真空干泵应用领域的日益增多,对真空干泵运行的可靠性提出更高的要求,而温度是检验可靠性的一个重要标准,因此有必要对真空干泵用电机温度场进行仿真分析与试验^[3-5]。

本文设计了1台4.5 kW真空干泵用屏蔽电机,建立了电机与机壳一体的三维模型,通过有限元软件仿真得到电机各部分损耗,确定了系统内热源激励,根据电机内部热交换及相关传热学理论^[6-7],确定散热边界条件,假设理想情况,进行温度场仿真得到电机内部的温度分布情况,并通过改变冷却水流量、水道宽度、水道数及冷却水温度分析冷却系统对真空干泵用屏蔽电机温升的影响。搭建试验平台,对样机进行温升试验,实时记录样机温度。将仿真计算结果与试验数据进行对比,说明两者差值在允许范围内,验证了电机设计的合理性。

1 真空干泵用屏蔽电机结构模型及温度场分析

1.1 真空干泵用屏蔽电机结构模型

4.5 kW真空干泵用屏蔽电机部分参数如表1所示。

根据电机参数建立真空干泵用屏蔽电机三维模型如图1所示。本文所研究的4.5 kW真空干泵用屏蔽电机的冷却方式设计为水冷,即沿着机

壳圆周方向设置螺旋水道。

表1 真空干泵用屏蔽电机部分参数

参数名称	参数值
额定电压/V	180
额定频率/Hz	100
额定电流/A	17
额定转速/(r·min ⁻¹)	5 800
额定转矩/(N·m)	7.5
绝缘等级	F

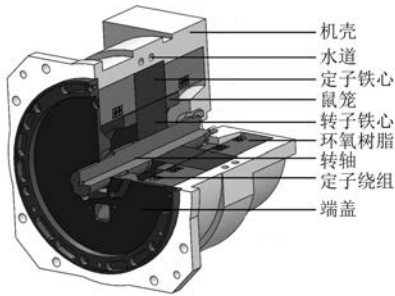


图1 真空干泵用屏蔽电机三维模型

1.2 电机内温度场求解的数学模型

电机内部热量传递的主要形式为热传导,根据传热学基本原理,屏蔽电机内的稳态温度场的数学模型^[8]可表示为

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (1)$$

式中: K 为电机内介质的导热系数; K_x 、 K_y 、 K_z 分别为电机内介质在 x 、 y 、 z 方向上的导热系数; T 为物体温度; q 为热流密度; c 为比热容; ρ 为物体的密度; τ 为时间; n 为物体边界的法向量; α 为散热系数; T_e 为冷却介质温度。

式(1)中第一项右端等于零,即 $\partial T/\partial \tau = 0$,说明温度收敛趋于稳定。式(1)即为三维稳态温度场的数学模型^[9]。

1.3 温度场热源激励与边界条件

为了合理简化计算过程,温度场模型的热源

设置与边界条件如下^[10-12]。

1.3.1 热源设置

运用有限元分析软件进行电磁仿真,得到电机额定运行时的各部分损耗如表2所示。在温度场仿真中将各部分损耗分别赋予各个发热部件。

表2 真空干泵用屏蔽电机内主要热源参数 W

损耗参数	参数值
定子铜耗	256
转子铜耗	193
定子铁耗	45
转子铁耗	12
总损耗	506

1.3.2 边界条件

定子和转子内各部件间是热传导边界。机壳表面无空气对流,将机壳表面设为自然散热面边界。温度场仿真计算的环境温度与样机温升试验时均为 25℃,以便对比。

真空干泵用屏蔽电机水冷系统的冷却方式属于管道内强制对流传热,将水冷系统的传热能力等效成水道传热系数,并假设水道内表面光滑,无摩擦阻力。根据传热学原理^[13],有:

$$\begin{cases} Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \\ Nu = \frac{hl}{\lambda} \\ Pr = \frac{v}{a} \\ a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Nu 为努塞尔 (Nusselt) 数; Re 为雷诺 (Reynolds) 数; Pr 为普朗特 (Prandtl) 数; h 为水道传热系数; l 为水道直径; λ 为流体热导; v 为运动黏度; a 为热扩散率; ρ 为流体密度; c_p 为比热容。

试验中冷却水为 25℃ 恒温水,因此计算时水的物性均以 25℃ 时取值。将计算结果代入温度场仿真中。

2 真空干泵用屏蔽电机温度场仿真

将真空干泵用屏蔽电机的三维模型导入有限元仿真软件进行温度场仿真分析。图2所示为真空干泵用屏蔽电机整体温度分布云图。由图2可知定子绕组端部温度最高,为 77.07℃,这是由定子绕组浇筑环氧树脂密封导致绕组端部散热条件

较差和定子绕组铜耗较大造成的。机壳侧面温度为 37℃,中间部分有冷却水道的存在,使温度保持在约 25℃。

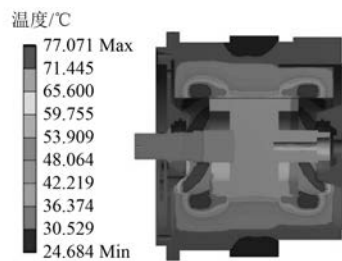


图2 屏蔽电机整体温度分布云图

为了更加清楚地了解电机内各部分温度分布情况,图3~图8分别列出了定、转子铁心、绕组、环氧树脂以及转轴的温度分布情况。定子外侧与环氧树脂外侧紧贴机壳,热量传递效率高,温度梯度大,同时定子绕组端部被环氧树脂紧密包裹,两者最高温度相同。

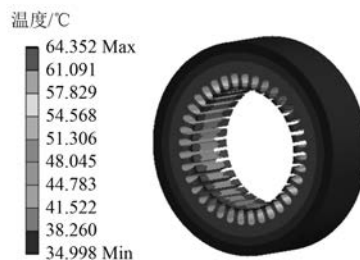


图3 屏蔽电机定子温度分布云图



图4 屏蔽电机转子温度分布云图

3 冷却系统对电机温度的影响

根据牛顿冷却定理^[14]:

$$Q = \alpha S (T - T_0) \quad (3)$$

式中: Q 为传热量; α 为传热系数; S 为传热面积; $(T - T_0)$ 为壁面与流体间温度差。

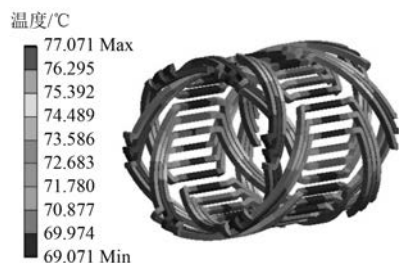


图5 屏蔽电机定子绕组温度分布云图

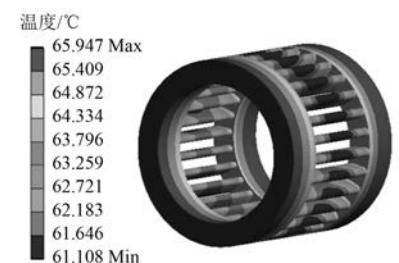


图6 屏蔽电机转子鼠笼温度分布云图



图7 屏蔽电机环氧树脂温度分布云图



图8 屏蔽电机转轴温度分布云图

由式(4)可知,水道传热量与水道传热系数和传热面积有关,而水道传热系数和传热面积与冷却水流量、水道宽度和水道数等有关。因此,设计合理的冷却系统对电机温升具有不可忽视的影响。

3.1 冷却水流量对电机温度的影响

在真空泵实际工作环境中,冷却水的流量调

节范围为 3~4 L/min。保持水道不变,改变冷却水流量,可得到不同流量下的电机各部件温度值,如图 9 所示。

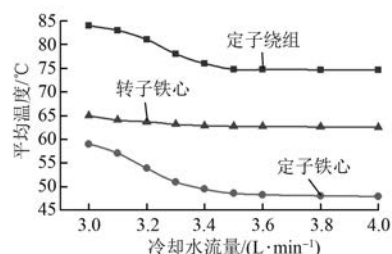


图9 冷却水流量对电机各部件平均温度的影响

冷却水道中通水量的增加,在一定范围内可以有效减小电机部件的温升值。当通水量增加至 3.5 L/min 时,继续增加通水量,电机各部件的温度变化并不明显,说明冷却水流并没有带走更多的热量。因为电机腔体内处于真空状态,所以增大流量对转子温度的影响并不明显。

3.2 冷却水道宽度对电机温度的影响

保持水道数与流量不变,改变水道宽度和冷却水的散热面积,直接影响水道的传热量,仿真结果如图 10 所示。

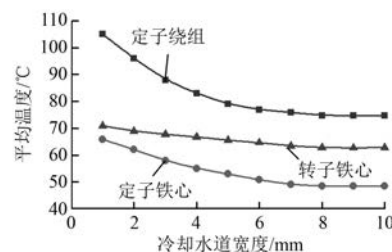


图10 冷却水道宽度对电机各部件平均温度的影响

从图 10 可见,当水道横截面直径为 1 mm 时,电机基本不存在水冷,温度最高达到约 105 °C,电机定子绕组与定子铁心的温度均随着水道宽度的增加而明显减小,而转子铁心温度减小程度则相对较小。随着水道宽度的增加,电机各部分温升逐渐趋于平稳。当水道宽度为 8 mm 时,继续增大水道宽度,电机各部件温度基本无变化,这是由于冷却水所带走的热量是一定的,水道带走的热量达到饱和。因此,冷却水道宽度选择 8 mm 比较合理。

3.3 冷却水道数对电机温度的影响

通过改变水道圈数同样可以改变水道的传热

面积,从而改变水道传热量。保持水道其他条件不变,计算不同圈数下电机各部件平均温度的变化情况,如图 11 所示。

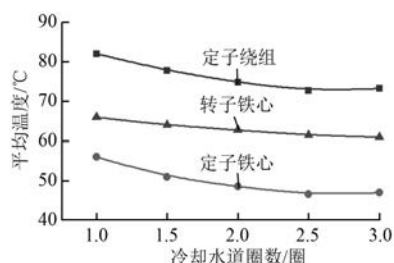


图 11 冷却水道圈数对电机各部件平均温度的影响

从图 11 可见,随着水道圈数的增加,电机各部件温度均在降低,但下降的幅度越来越小,在 2.0 圈水道后基本保持不变。水道圈数增加,与之相匹配的水泵功率也随之上升,因此综合考虑电机散热及水泵功率,选择 2.0 圈水道较为合理。

4 冷却水温对电机温度的影响

在上述流量为 3.5 L/min、水道横截面直径为 8 mm、水道圈数为 2.0 圈的条件,分析冷却水温对电机温度的影响。分别计算 10、20、30、40 °C 恒温冷却水时电机内各部件的温度,结果如图 12 所示。

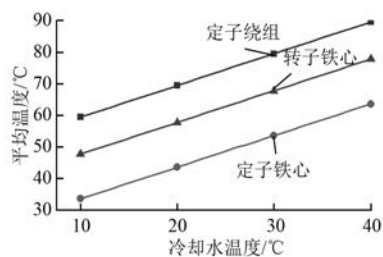


图 12 冷却水温度对电机各部件平均温度的影响

由图 12 可见,冷却水温度对电机温度的影响较大,随着冷却水温的提高,电机各部分温度相应升高,几乎呈线性增长。冷却水温每增加 10 °C,电机各部件温度相应升高约 10 °C。

4 真空干泵用屏蔽电机温升试验

为了验证温度场仿真计算结果的准确性和方法的合理性,对真空干泵用屏蔽电机进行温升试验。搭建真空干泵用屏蔽电机试验平台,如图 13 所示。在试验样机定子绕组端部安装 PT100 热

传感器,实时监控定子绕组端部温度。试验时环境温度为 25 °C,结果如图 14 所示。

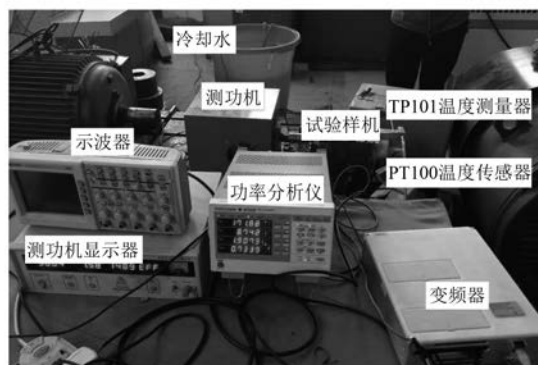


图 13 真空干泵用屏蔽电机试验平台

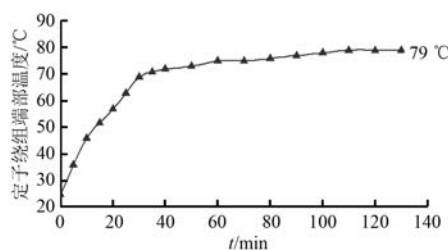


图 14 真空干泵用屏蔽电机温升试验曲线

通过对比试验数据与有限元仿真分析结果可知,有限元仿真分析定子绕组温度为 77.07 °C,试验测试定子绕组温度为 79 °C。以试验数据为基准,2 组数据的相对差值为 2.4%。两者差值包含了仿真计算时的一些假设和等效处理,差值在合理范围内。

5 结 语

本文以 1 台 4.5 kW 真空干泵用屏蔽电机为例,建立电机三维模型,利用有限元分析软件进行三维温度场仿真、冷却系统分析以及温升试验,得出以下结论:

(1) 在恒温水冷条件下,真空干泵用屏蔽电机的温度分布沿径向由外向内逐渐升高,稳定工作在额定点时,应加强定子绕组端部的温度监测,该部位铜耗相对较大,散热条件较差,温升最高,是电机温度监测的重点区域。

(2) 本文的案例电机,选用直径为 8 mm、2.0 圈螺旋水道、冷却水流量 3.5 L/min 的冷却系统,参数合理。

(3) 温度场仿真计算结果与试验结果差别较小,验证了电机设计的合理性,为真空干泵用屏蔽电机新产品开发提供了一定的参考依据。

【参考文献】

- [1] 刘敏强.真空仪器设备应用与发展[J].中国仪器仪表,2017(9): 21.
- [2] 杨乃恒.干式真空泵的原理,特征及其应用[J].真空,2000(3): 1.
- [3] 安跃军,殷福久,王光玉,等.真空泵屏蔽电动机温度场与屏蔽套应力场分析[J].沈阳工业大学学报,2016,38(2): 121.
- [4] 宋存丰.真空泵用屏蔽式感应电动机冲击载荷失速和重投特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2019.
- [5] 安跃军,张志恒,张振厚,等.真空干泵用屏蔽电机无速度传感器带速重投控制系统[J].电工技术学报,2018,33(12): 2665.
- [6] 路义萍,孙雪梅,杜鹏,等.CFD 设置对凸极同步电动机转子温度场影响[J].哈尔滨理工大学学报,2015,20(3): 91.
- [7] 陈益广,郑军,魏娟,等.舵机用永磁同步电机的设计与温度场分析[J].电工技术学报,2015,30(14): 94.
- [8] 胡鑫,安跃军,杨维国,等.基于流固耦合方法的真空泵用屏蔽电机冷却系统分析[J].电机与控制应用,2020,47(2): 80.
- [9] 安跃军,张振厚,张强,等.干式涡旋真空泵用特种电机温度场仿真与实验[J].电机与控制学报,2017,21(8): 48.
- [10] 李勇,姜新通,赵伟,等.直驱螺杆泵用永磁低速伺服系统三维温度场研究[J].电机与控制学报,2011,15(6): 57.
- [11] CHEN S J, ZHANG Q, HE B, et al. Thermal analysis of high density permanent magnet synchronous motor based on multi physical domain coupling simulation [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2017, 12(1): 91.
- [12] CAO Z, LI W, LI J, et al. Research on the temperature field of high-voltage high power line start permanent magnet synchronous machines with different rotor cage structure[J]. Energies, 2017, 10(11): 1829.
- [13] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社,2006.
- [14] 魏永田,孟大伟,温佳斌.电机内热交换[M].北京:机械工业出版社,1998.

(上接第 59 页)

- [16] 梁大伟.大型水轮发电机定子温度与热应力的耦合计算[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2012.
- [17] 安跃军,殷福久,王光玉,等.真空泵屏蔽电动机温度场与屏蔽套应力场分析[J].沈阳工业大学学报,2016,38(2): 121.
- [18] 汤蕴璆.电机学[M].北京:机械工业出版社,2014.

(上接第 63 页)

【参考文献】

- [1] 王平.船舶轴系扭振计算方法的研究[D].大连:大连海事大学,2002.
- [2] 龚海军.柴油机扭振分析及减振器匹配研究[D].长春:吉林大学,2004.
- [3] 高顶云,王晓明.高弹性联轴器及其在舰船和陆用动力装置中的应用[J].船舶工程,1998,20(1): 34.
- [4] 马怀腾,张权,李东升.某型船用大功率柴油发电机组轴系扭振分析及惯量盘设计[J].船舶工程,2016,38(增刊2): 139.
- [5] 张平,马怀腾,孙瀚青.船舶柴油发电机组轴系扭转振动影响因素[J].机电设备,2017,34(5): 47.