

基于流固耦合方法的真空泵用屏蔽电机 冷却系统分析*

胡鑫¹, 安跃军¹, 杨维国¹, 孔祥玲², 毕德龙², 师勇³, 朱盛⁴

(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 110168;

3. 大连金石泵业有限公司设计研究中心, 辽宁 大连 116113;

4. 大连恒鑫机械有限公司屏蔽电泵事业部, 辽宁 大连 116113)

摘要: 针对罗茨真空泵驱动电机在特殊环境下运行温升过高而导致电机烧毁的问题, 通过流固耦合法综合选择合适的冷却系统, 以保证电机的有效散热。以 5 kW 电机为研究对象, 通过有限元法建立周向螺旋水路和轴向折返水路的电机仿真模型。基于流固耦合传热理论, 分析电机内冷却介质的流动状态和电机温度分布, 利用计算流体动力学(CFD)和温度场从流速、进出水口压差、电机鼠笼和绕组的温度分布等方面综合比较并选择更合适的冷却水路结构和尺寸配置。最后, 对相应样机进行温升试验。试验数据与仿真数据吻合较好, 从而验证了冷却系统设计的合理性以及仿真分析的准确性, 为产品批量生产提供了科学依据。

关键词: 屏蔽电机; 真空泵; 计算流体动力学; 冷却系统; 流固耦合; 温升试验

中图分类号: TM 358 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)02-0080-06

doi: 10.12177/emca.2019.153

Analysis of Cooling System of Shielded Motor for Vacuum Pump Based on Fluid-Structure Coupling Method*

HU Xin¹, AN Yuejun¹, YANG Weiguo¹, KONG Xiangling², BI Delong², SHI Yong³, ZHU Sheng⁴

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

2. Vacuum Dry Pump Division, SKY Technology Development Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China;

3. Design Research Center, Dalian Jinshi Pump Industry Co., Ltd., Dalian 116113, China;

4. Shielded Electric Pump Division, Dalian Hengxin Machinery Co., Ltd., Dalian 116113, China)

Abstract: When the Roots vacuum pump drive motor runs under some special environments, the temperature rise of the motor is too high and then causes overburning. In order to solve this problem, the fluid-structure coupling method is used to select the appropriate cooling system to ensure the effective heat dissipation of the motor. Taking a 5 kW motor as the object, the motor simulation models of circumferential spiral channel and axial zigzag channel are established by finite element method. Based on the fluid-structure coupling heat transfer theory, the flow state of the cooling medium in the motor and the motor temperature distribution are analyzed. Taking the flow rate, inlet and outlet pressure difference, and temperature distributions in the motor squirrel cage and winding into consideration, the more suitable cooling water channel structure and size configuration are selected by utilizing the computational fluid

收稿日期: 2019-11-13; 收到修改稿日期: 2019-12-23

* 基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX2201005-002)

作者简介: 胡鑫(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机及其控制。

安跃军(1962—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为特种电机及其控制。

dynamics (CFD) software and temperature field analysis. Finally, the temperature rise test of the prototype is carried out, and the test results are in good agreement with the simulation data. The rationality of the cooling system design and the accuracy of the simulation analysis are verified, providing a scientific basis for mass production of the product.

Key words: shielded motor; vacuum pump; computational fluid dynamics (CFD); cooling system; fluid-structure coupling; temperature rise test

0 引言

罗茨真空泵是一种无内压缩的旋转变容积式真空泵。依据不同的工作压力范围,可以将罗茨真空泵分成3种:低真空罗茨泵(能够直排大气)、中真空罗茨泵(又称机械增压泵)、高真空多级罗茨泵^[1]。罗茨真空泵广泛应用于多个领域,包括制药、航空航天、化工、薄膜和半导体行业等,对国民经济起着重要作用^[2-3]。电机温升是衡量电机性能的重要指标,由于真空泵复杂的运行工况,真空泵驱动电机作为核心部件,其温升直接影响了泵载系统的安全性与可靠性。因此,准确计算电机温度分布和合理设计冷却系统对真空泵的安全稳定运行具有重要意义。

电机的温升计算方法包括简化公式法、等效热网络法^[4]、有限元法等。其中,简化公式法的优点是容易计算,缺点是计算结果不够精确,不能够整体看出电机的温度分布,以及零部件的过热点^[5],只可估算出铁心及绕组平均温升。等效热网络法的优点是计算方便,网格划分灵活,在磁场、电场和温度场都可使用,但该方法的思想基于集中参数,对于过热点的方位也不能精确计算^[6]。有限元法边界适应性好,计算准确度高,可获得电机温度场分布以及过热点位置^[7]。数值计算方法和计算机技术这几年发展迅速,有限元法计算精度比较高,因此越来越多的应用于电机的温升计算。

本文采用有限元法,对电机采用机壳内部水冷的冷却系统,建立真空泵驱动电机的流-固耦合模型,仿真分析水道流场和电机温度场,比较螺旋型、折返型2种水路结构的冷却效果,并对相应样机进行温升试验。试验结果验证了该冷却系统设计的合理性及仿真模型的正确性。

1 真空泵驱动电机尺寸参数

罗茨真空泵驱动电机由机壳、定子铁心、定子绕组、定子屏蔽套、转子铁心、转子绕组和转轴组成。5 kW 真空泵驱动电机三维模型如图1所示。

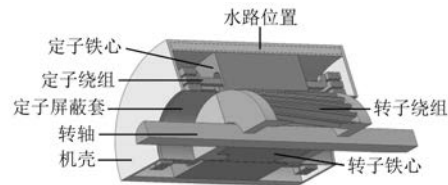


图1 5 kW 真空泵驱动电机三维模型

电机转子绕组的结构形式为笼型,由铜条焊接而成,定转子均采用梨型槽。定子内径应用屏蔽套的方式屏蔽,隔离转子和机壳腔体,保证真空环境的绝对无泄漏^[8]。屏蔽套材料为 Sus316L,为非导磁型屏蔽套。图1中虚线处为电机的水路位置。电机的基本参数如表1所示。

表1 真空泵电机的基本参数

参数名称	参数值
功率/kW	5
额定电压/V	380
极数	2
相数	3
额定频率/Hz	60
屏蔽套厚度/mm	0.5
冷却方式	水冷
进水口温度/°C	25
进水流量/(L·min ⁻¹)	6.5
绝缘等级	H
防护等级	IP66
安装方式	IMB5
驱动方式	变频器驱动

2 水路结构

2.1 水路介绍

冷却水路根据在电机机壳内的分布方式可分为2种:(1)隔板沿电机机壳的圆周方向呈螺旋状分布,即周向水路;(2)隔板沿机壳轴向方向平行分布,即轴向水路。周向螺旋型水路的水路平滑,水流阻力损失小,但其进出水口很难设计到电

机的同一端, 进出水口的温度差异会使电机两端产生温度梯度^[9]。轴向折返型水路可以把进出水口设计在电机的同一端, 散热良好, 不会在电机两端产生温度梯度, 制造工艺简便, 结构简单, 易加工, 但在电机中存在许多转弯及倒角, 水流阻力损失较大^[10]。

本文在建立螺旋型水路和折返型水路的三维模型时对电机采用相同的机壳尺寸, 2 种水路结构下的水道深度一致。图 2 所示分别为螺旋型水路、折返型水路的简化模型。

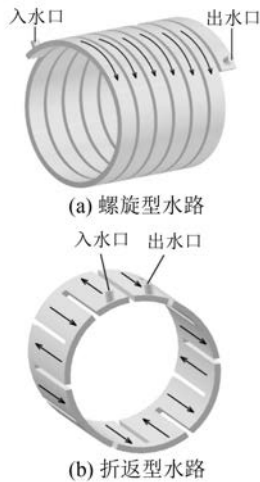


图 2 电机 2 种冷却水路结构简化模型

2.2 CFD 理论基础

计算流体动力学 (CFD) 是对基于数值求解控制流体流动原理的微分方程进行求解计算, 从而得到流体流动的流场全部求解域离散的形式, 近似模拟出流体流动的状态^[11]。图 3 所示为流体场有限元分析步骤流程图。

电机水道中冷却液的流动应同时满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。当流体为稳定流动状态且不可压缩时, 其控制方程可表示为^[12]

$$\nabla \cdot (\rho \Lambda \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \Lambda) + S_\Lambda \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; Λ 为可选变量, 在连续性方程中为常数 1, 在动量方程中为各方向速度分量 u_x, u_y, u_z , 在能量方程中为单位质量内能 e , 在湍流方程中分别为湍流动能 k 和湍流耗散率 ε ; \mathbf{u} 为流体的速度矢量; Γ 为扩散系数; S_Λ 为源项参量。

在流体力学中, 雷诺数是流体惯性力与黏性力比值的量度^[13]。如果计算得出的雷诺数小, 表

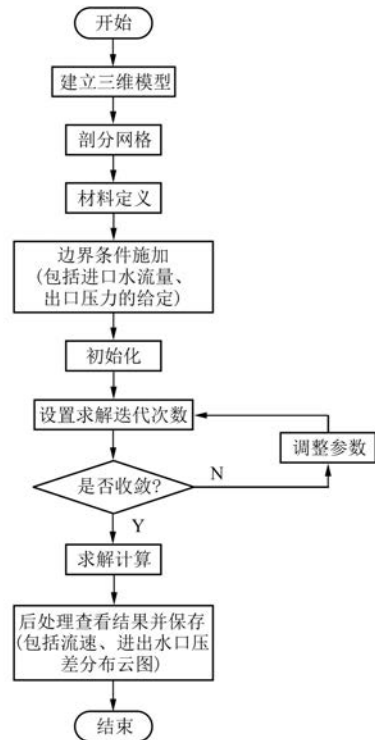


图 3 流体场有限元分析步骤流程图

明占主要地位的是流体在流动时每个质点之间的黏性力, 流体中每个质点的流动状态均有规律, 流动方向根据管道内壁平行, 其流动状态为层流。如果计算所得的雷诺数大, 说明主要为惯性力, 流动状态表现为湍流, 也称为紊流。当雷诺数 $< 2\ 300$, 称作层流状态; 雷诺数 $> 2\ 300$, 称作湍流状态。雷诺数计算公式为

$$Re = \rho \frac{ud}{\eta} \quad (2)$$

式中: d 为管径; η 为流体的动力黏度。

根据计算可得, 螺旋型水路的雷诺数为 8 464, 折返型水路的雷诺数为 5 653, 2 种冷却水道中的冷却液在流动时的雷诺数均较大 ($> 2\ 300$), 为湍流状态, 因此流体模型为湍流模型。依据客户端现场工况, 在仿真时设置边界条件为: 电机冷却系统进水口流量 6.5 L/min、出水口压力 0 Pa, 边界条件施加完毕后即可进行求解运算, 从而计算得到电机的流体场分布云图。

2.3 CFD 流场分析

2.3.1 流速比较

图 4、图 5 所示为螺旋型水路和折返型水路的流速分布云图。由图 4 可见, 螺旋型水路水的

流速比较均匀,每一层水路的流速近似,平均流速约为 0.617 m/s。由图 5 可见,折返型水路的平均流速约为 0.697 m/s,在沿轴向部分水的流速最大,能达到 0.894 m/s,水流具有明显的湍流趋势,能更快速地带走电机的热量,但也能看出水路的转弯和尖角处流速较低,约为 0.499 m/s,很可能在此处产生高温。

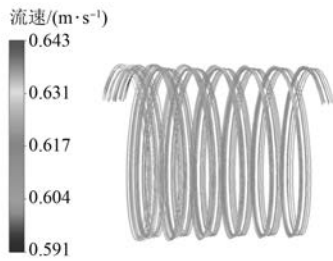


图 4 螺旋型水路流速分布云图

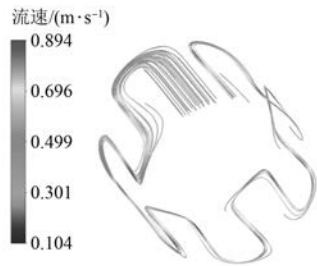


图 5 折返型水路流速分布云图

2.3.2 压差比较

图 6、图 7 所示为螺旋型水路和折返型水路的压强分布云图。由图 6 可见,螺旋型水路进出水口压差 $\nabla p = 2\ 730\ \text{Pa}$,能量损失较小。由图 7 可见,折返型水路进出水口压差 $\nabla p = 4\ 230\ \text{Pa}$,能量损失相对较大,高于螺旋型水路约 54.9%;水路沿轴向直线几乎没有压差,但是在直角位置以及对应的折返位置分界线特别清晰,表明冷却水在水路的这 2 个位置压力损失大,因此造成了冷却水压强变化明显并且出现部分位置压强不均匀的现象^[14]。

2.4 流固耦合温度场分析

以笛卡尔坐标系为基准,可以将罗茨真空泵驱动电机的传热情况转化成电机各部件内部为热源的三维瞬态导热问题,最终的热平衡方程可以应用拉普拉斯微分方程表示。三维导热微分方程及边界条件为^[15]

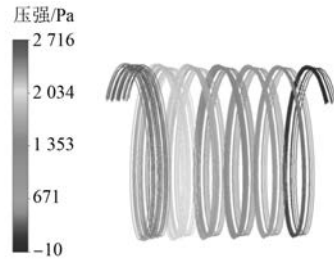


图 6 螺旋型水路压强分布云图

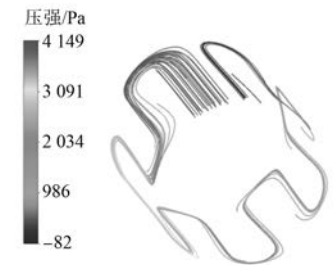


图 7 折返型水路压强分布云图

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v = \\ \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} - \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) \Big|_{s_1} = q_0 \\ \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) \Big|_{s_2} = \alpha (t - t_f) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 为各介质沿 x, y, z 方向的导热系数; t 为物体温度; q_v 为热流密度; c 为比热容; n 为物体边界的法向量; s_1, s_2 为电机绝热界面; q_0 为通过 s_1 的热流密度; t_f 为流体的温度。

基于多物理场协同仿真平台,将电机在额定工况下运行时的损耗作为热源对应添加至定子铁心、定子绕组、转子铁心及鼠笼导条后,经 2 种不同的冷却系统进行冷却散热。加载流体 CFD 的计算结果与固体热源耦合仿真,设置进水口温度为 25 °C,环境温度为 26 °C,仿真得到电机各部分的温度场分布云图。

2.4.1 鼠笼温度比较

图 8 所示为螺旋型水路电机鼠笼的温度分布。由图 8 可见,鼠笼整体温度在轴向基本对称,这是由电机轴向对称结构决定的;鼠笼最高温度在端环处,达到 102.0 °C。分析可知,对于封闭式的驱动电机,因为转子鼠笼位置处于电机内部,无冷却系统,呈相对隔绝的状态,所以电机运行时所

产生的热量不易散出,从而导致温升较高。

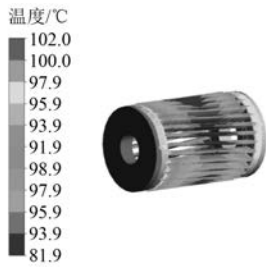


图8 螺旋型水路电机鼠笼温度分布图

图9所示为折返型水路电机鼠笼的温度分布。由图9可见,折返型水路电机鼠笼的温度分布趋势与螺旋型水路相同,端环温度最高,达到98.1℃,导条温度最低点处,为80.1℃。

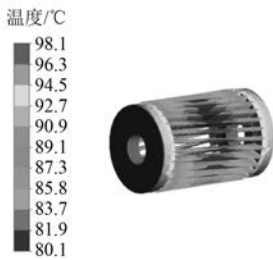


图9 折返型水路电机鼠笼温度分布图

2.4.2 绕组温度比较

图10所示为螺旋型水路电机绕组的温度分布。由图10可见,绕组温度最高的位置在绕组端部,为121.5℃。这是由于电机绕组产生的热量主要通过热传导传递到定子再传递到机壳,最后被冷却水带走,而水道覆盖的范围内均为有效绕组。由此可知,有效绕组的温度较低,散热较好;而真空泵驱动电机的气隙导热能力较差,故绕组端部散热困难,温升高于有效绕组。

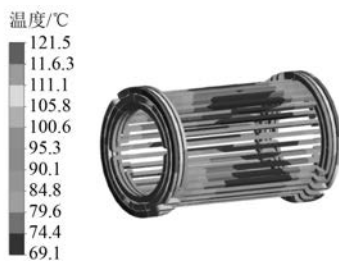


图10 螺旋型水路电机绕组温度分布图

图11所示为折返型水路电机绕组的温度分布。由图11可见,温度最高的位置仍在绕组端部,为111.2℃,比螺旋型水路电机低10.3℃,冷

却效果更好。

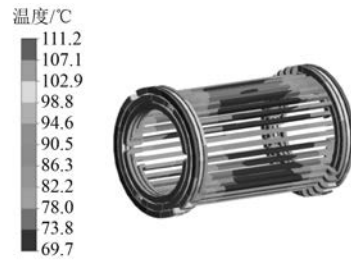


图11 折返型水路电机绕组温度分布图

结合以上仿真结果可知,在边界条件相同的情况下,折返型水路水的平均流速比螺旋型水路大;流固耦合分析下折返型水路电机的鼠笼与绕组的最大温升均比螺旋型水路低,可见折返型水路冷却效果更好。表2所示为2种水路的温升仿真结果统计表。

表2 2种水路温升仿真结果统计表

冷却系统	鼠笼温升/K	绕组温升/K
螺旋型水路	76.0	95.5
折返型水路	72.1	85.2

3 温升试验

为了验证电机流体场、温度场仿真结果的正确性,研制螺旋型、折返型水路2种冷却系统下的电机样机并进行额定工况下的温升试验。图12所示



(a) 螺旋型水路



(b) 折返型水路

图12 电机2种水路实物图

为 2 种水路的实物图。电机温度的采集通过绕组端部预先埋置的 Pt100 温度传感器进行, 测试过程中的外界条件与仿真时的边界条件保持一致, 即进口水流量为 6.5 L/min, 进口水温为 25 ℃。真空泵驱动电机温升试验平台如图 13 所示。

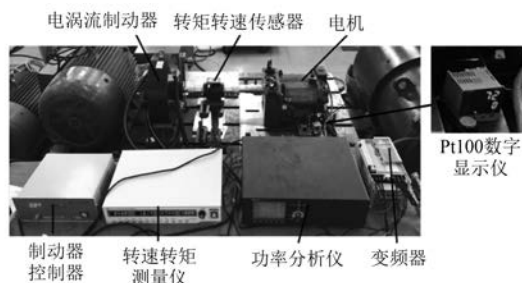


图 13 真空泵驱动电机温升试验平台

试验时使电机在额定点稳定运行, 记录与 Pt100 所连接的智能数字显示仪显示的绕组端部温度, 直到温度示数稳定不变, 此时视为真空泵驱动电机温度达到稳定。表 3 为 2 种冷却系统的电机绕组温升仿真值与试验值。根据测试结果可知, 折返型水路结构的电机冷却效果更好, 证明电机基于流固耦合的温度场仿真模型正确有效。

表 3 电机绕组温升仿真值与试验值

冷却系统	仿真值/K	试验值/K	误差/%
螺旋型水路	95.5	98.4	2.95
折返型水路	85.2	88.4	3.62

4 结 语

本文从工程实际遇到的问题出发, 对罗茨真空泵驱动电机设计了周向螺旋型和轴向折返型 2 种水路结构, 建立流固耦合仿真模型, 利用 CFD 和温度场综合分析冷却效果。仿真结果表明, 与螺旋型水路相比, 折返型水路冷却水平均流速提高了 12.9%, 进出水口压差增大了 54.9%, 电机鼠笼温升降低了 5.1%, 电机绕组温升降低了 10.8%, 冷却效果更优。制作样机对电机进行温升试验, 试验结果表明, 在水路深度一致的前提下, 折返型水路电机绕组温升比螺旋型水路电机绕组温升降低了 10.2%, 与 CFD 流固耦合仿真分析的结果相符。试验验证了仿真的真实性与可靠性, 为真空泵驱动电机的冷却系统设计提供了参考, 也为产品批量生产奠定了基础。

【参 考 文 献】

- [1] 张宇. 罗茨真空泵内部流场的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [2] 杨乃恒. 真空获得设备[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 59-84.
- [3] 岳向吉, 巴德纯, 刘坤, 等. 干式罗茨真空泵吸气级内流动的瞬态模拟[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(9): 850.
- [4] YOHESWARAN B, PULLEN K R. Flow and convective heat transfer in disk-type electric machines with coolant flow[C] // 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2014.
- [5] 张祯海, 迟长春, 练正兵, 等. 高功率密度笼型异步风力发电机通风结构优化分析[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(4): 53.
- [6] 程树康, 李翠萍, 柴凤. 不同冷却结构的微型电动车用感应电机三维稳态温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 82.
- [7] 王小飞, 代颖, 罗建, 等. 电动汽车牵引水冷异步电机耦合场分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(4): 110.
- [8] 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.
- [9] 佟文明, 程雪斌. 高速水冷永磁电机冷却系统分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(3): 16.
- [10] 杨学威, 张小发. 电机壳体 Z 字型冷却水道设计[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(9): 62.
- [11] KIM J H, JUNG I S, HUR N, et al. Analysis on characteristics of heavy vehicle electrical cooling fan with CFD and motor test results [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.4684.
- [12] 安跃军, 孟昭军. 电机系统及其计算机仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 42-47.
- [13] RAJAGOPAL K R. The thermo-mechanics of rate-type fluids [J]. Discrete and Continuous Dynamical Systems: S, 2012, 5(6): 1133.
- [14] 吴柏禧, 万珍平, 张昆, 等. 考虑温度场和流场的永磁同步电机折返型冷却水道设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2306.
- [15] 柏静儒, 辛思谕, 王擎. CFD 软件在传热学教学中的应用及浅析[J]. 中国电力教育, 2014(29): 43.