

铜转子三相异步电动机温度场流场耦合分析*

陈起旭¹, 王云洪², 杨来顺², 徐俊¹, 曹秉刚¹

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 青岛海西电机有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 研发了一台应用在石油顶驱钻井设备的强迫风冷铜转子三相异步电机, 首创了无机座设计、定子铁心轭部开通风孔、定子绕组端部环氧树脂密封、采用焊接铜条鼠笼转子等关键技术, 满足了电机在频繁起停、过载、盐雾等工况下, 对电机温升的苛刻要求。建立了温度场流场流固耦合模型, 分析了电机额定负载工况下的各零件稳态温度分布以及瞬态温度随时间变化趋势。仿真计算和温升试验结果表明, 沿电机的轴线方向, 中后段位置温度较高, 没有局部过热点。试验验证了建立的温度场流场耦合模型和仿真结果的合理性, 温升满足电机 H 级要求。在耦合模型的基础上, 分析了风道入口压力和定子铁心通风孔径变化对电机温升的影响, 为改进电机冷却结构提供理论基础。

关键词: 铜转子三相异步电机; 温度场; 流场; GAMBIT 前处理软件; FLUENT; 耦合

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)10-0077-06

Temperature-Fluid Field Coupling Analysis of Three Phase Asynchronous Motor with Copper Rotor*

CHEN Qixu¹, WANG Yunhong², YANG Laishun², XU Jun¹, CAO Binggang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Qingdao Haixi Electrical Machine Limited Corporation, Qingdao 266000, China)

Abstract: A special three phase asynchronous motor applied to top drive facility was studied, which uses the compulsorily ventilation and non-standard design. Critical techniques, such as non-base design, ventilation hole of stator iron yoke, epoxy resin sealing at stator winding end, and squirrel-cage rotor composed of copper bars were adopted, which satisfy the strict requirements under the condition of frequent start and stop, overloading, and salt-mist. Temperature-fluid field coupling model was established, and then the transient-state temperature trends and steady-state temperature distribution of the parts of motor under the rating condition were analyzed. The results of simulation and thermal rising test showed that the temperature in the axial direction was higher at the locations of the posterior segment, and testify that the temperature distribution has no local hot spot. At the same time, experiment verifies that the temperature-fluid field coupling model and result are reasonable, which satisfy the requirement of H level temperature rise. The effect of inlet pressure and ventilation hole diameter change on temperature rise were analyzed on the basis of coupling model, which provides the theoretic foundation for improving cooling structure of motor.

Key words: three phase asynchronous motor; copper rotor; temperature-fluid field; GAMBIT; FLUENT; coupling

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405374)

作者简介: 陈起旭(1982—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为特种电机本体设计与控制、能量管理。

0 引言

石油顶驱钻采设备上应用的立式强迫风冷三相异步电动机(以下简称异步电机),其对应应用场合空间要求严格,环境恶劣;电机单机容量、电磁负荷较高;单位体积的损耗带来的温升问题,如绝缘破坏、受热膨胀引起的电机装配误差、温度变化引起的电磁参数变化等不利影响,对电机的寿命和可靠性带来挑战。准确的计算电机温升和温度分布,降低或消除局部过热点,使电机的冷却结构更为合理,提高产品的可靠性和寿命,缩短产品的研发周期及费用,显得尤为重要。

近年来,国内外专家学者对于异步电机的温升做了大量的研究。文献[1-3]采用等效热路法比较准确地描述了电机的热路模型,物理意义明确,计算量相对较小,然而该方法不能很好地确定电机各零部件温度的实际分布以及某一点的温度。文献[4-5]采用二维或三维有限元方法进行了电机全域温度场的仿真,并进行了试验验证,但是温度场仿真中的定子绕组端部、通风孔、气隙处定转子表面的对流换热系数大多根据经验公式来确定,而电机内部实际的流场中,不同位置对应的对流换热系数往往不是常数,就给模型计算的准确性带来挑战。文献[6-8]只考虑定子温度场或者只考虑转子温度场,忽略了定转子之间空气的热传导作用。文献[9]二维模型只针对电机轴向中心截面建模,没有考虑轴向热传导的作用,也没有考虑机壳内空气域的流动情况,导致计算的温升与实际测量温度出现较大的偏差。

本文以强迫风冷三相异步电动机为研究对象,应用 GAMBIT 前处理软件建立了温度场流场流固耦合三维模型,生成了结构化有限元网格模型,读入到 FLUENT 软件,考虑了电机内部复杂的湍流运动,利用传热学的相关理论和方法施加边界条件,并结合电磁分析得到的损耗,施加生热率载荷,得到了额定工况下的电机稳态温度分布和瞬态温度随时间变化趋势。接着分析了入口风压和定子铁心通风孔径对电机温升的影响,通过温升试验的测量值与仿真计算值对比分析,仿真模型和温升数据可以较为准确地反映实际温度分布及趋势。

本文研发的强迫风冷、非国标特种三相异步电机,最大的创新点是采用铜条转子,定子铁心直接开孔,定子绕组端部环氧树脂塑封,如图 1 所示。风机电动机带动离心风机,产生一定风压。离心风机安装在盘刹上部,风通过风道进入上支架的进风口,穿过定转子铁心的通风孔、气隙,从下支架的出风口流出。

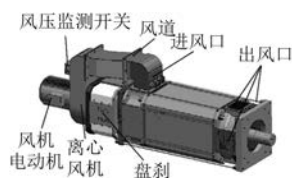


图 1 异步电机结构图

1 异步电机温度场数值计算

1.1 传热学基础及温度场分析数学模型

根据傅里叶导热定律,物体单位时间内通过单位面积传递的热量 q 与物体内的温度梯度 $\frac{\partial T}{\partial n}$ 成正比^[10-13],如式(1)所示:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

由此考虑一微元体的热平衡,可推导出导热微分方程的一般式,如式(2)所示:

$$\rho \cdot c_v \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (2)$$

为了求解上述方程,对于稳态导热,还需给出边界条件。常见的边界条件有以下 3 类:

(1) 边界上保持均匀的温度分布,即

$$T|_{s1} = T_0 \quad (3)$$

(2) 边界上保持恒定的换热量,即

$$\frac{\partial T}{\partial n}|_{s2} = -\frac{q_0}{\lambda} \quad (4)$$

(3) 已知周围介质温度及边界换热系数 α ,即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{s3} = \alpha(T - T_f) \quad (5)$$

由式(2)~式(5)可确定不同边界条件下各部分稳态温度场计算的数学模型。

对求解区域内所有单元进行分析,得到温度场的线性代数方程组:

$$[K] \cdot [T] = [F] \quad (6)$$

式中: $[K]$ ——总体热导系数矩阵;

[*T*]——求解域内全部节点温度所形成的温度矩阵;
[*F*]——总体热源矩阵。

求解上述线性方程组可得到各个节点温度。

1.2 异步电机求解域模型及有限元模型

对于不是热源且不会对电机整体温度场产生显著影响的支架、轴等零部件需进行简化。对于热源的零件,因热源通常是以生热率的方式施加,根据体积等效的原则,为了方便建模、网格划分,将定子绕组进行了直线化处理。根据如表 1 所示的电机的基本参数,以及模型的对称性,建立了 1/2 电机求解域模型,如图 2 所示。

表 1 异步电机的主要参数

额定功率/kW	额定电压/V	定子外径/mm	定子内径/mm	定子槽数
360	600	500	370	54
转子内径/mm	转子槽数	气隙/mm	转速/(r·min ⁻¹)	绝缘等级
140	44	1	1 200	H

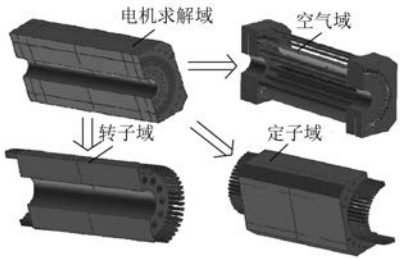


图 2 异步电机求解域

有限元模型的建立直接在 GAMBIT 前处理网格剖分软件中完成,这样处理有利于直接从温度场和流场的角度考虑网格的合理规划和控制,体与体采用共节点方式连接实现载荷传递。该有限元模型均使用六面体结构化网格,相对四面体网格,可大量减少单元和节点数量,提高计算精度和求解速度,有限元模型及其边界条件模型如图 3 所示。

1.3 异步电机内部生热、导热与换热

在忽略热辐射的情况下,电机的热量传递过程是导热和对流换热的综合作用。因此,讨论电机内部的换热条件,实际上主要是研究电机内各个零件的导热系数和表面对流换热系数。

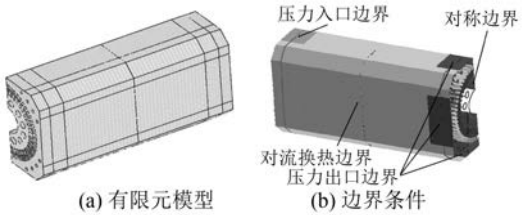


图 3 异步电机有限元模型与边界条件

1.3.1 异步电机的生热

电机的生热主要是由各种损耗产生的热量,包括定、转子铁耗,绕组铜耗,机械摩擦损耗,风摩损耗及附加损耗等。

(1) 基本铁耗主要由主磁场在铁心内发生变化而产生,包括磁滞损耗和涡流损耗。计算时,统一按硅钢片的基本铁耗来考虑^[10]。其一般表达式为

$$p_{Fe} = \kappa_{\alpha} p_{he} G_{Fe} \tag{7}$$

$$p_{he} \approx p_{10/50} B^2 (f/50)^{1.3} \tag{8}$$

式中: κ_{α} ——经验系数;
 G_{Fe} ——受交变磁化或旋转磁化作用的钢重;
 p_{he} ——钢的损耗系数;
 $p_{10/50}$ ——当 $B = 1 \text{ T}$ $f = 50 \text{ Hz}$ 时,硅钢单位质量内的损耗。

(2) 绕组铜耗^[10] 主要指绕组里的电气损耗,由式(9)可得

$$p_{Cu} = \sum (I_x^2 R_x) = m I^2 R \tag{9}$$

式中: I_x ——绕组 x 中的电流;
 R_x ——换算到基准工作温度的绕组 x 的电阻;
 m ——相数;
 I ——相电流;
 R ——相电阻。

(3) 机械损耗及其他附加损耗。因该电机为强迫风冷结构,机械损耗只考虑轴承摩擦损耗和转子风摩损耗。这两项损耗在大多数情况下均难以准确地计算,一般取输入或输出功率的一定百分数表示。这里取输出功率的 0.5% 均匀加在定、转子铁心上,可按经验公式式(10)~式(11)估算^[10]。对于铸铜转子的异步电机参考铸铝转子异步电机,杂散损耗 P_f 一般按输出功率 1%~3% 来计算。

$$P_f = 0.15 \frac{F}{d} v \cdot 10^{-5} \quad (10)$$

式中: F ——滚动轴承载荷;

d ——轴承内滚珠或滚柱直径;

v ——滚珠或滚柱线速度。

$$P_v = K_v \left(\frac{v}{10} \right)^2 Q_0 \quad (11)$$

式中: P_v ——风摩损耗;

K_v ——系数,通常取 0.175~0.185;

v ——转子圆周速度;

Q_0 ——总风量。

综上所述,三相异步电机的体热源载荷以生热率的方式加载。

1.3.2 异步电机的传导热

电机内部各零件都有各自的热属性参数,相互接触的零件,热量主要以热传导的形式传递。电机各零件的热属性参数如表 2 所示。

表 2 电机零件热属性参数

零件	材料	导热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	比热/ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
定子铁心	50WW270	40.6(径向) 3.4(轴向)	7 817	446
定子绕组	黄铜	110	8 530	380
转子铁心	50WW270	40.6(径向) 3.4(轴向)	7 817	446
转子导条	黄铜	110	8 530	380
绕组绝缘	聚酰亚胺薄膜	0.13	1 200	1 300
槽绝缘	NHN 绝缘纸	0.26	1 200	1 300

对于每槽上下层定子绕组等效为一个铜导热体,绝缘包含浸渍漆、槽绝缘和铜线漆膜,等效为槽绝缘。其等效槽绝缘导热系数按式(12)计算^[11-12]:

$$\lambda_{eq} = \sum_{i=1}^n \delta_i / \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (12)$$

式中: λ_{eq} ——槽内等效绝缘体的导热系数,假设等效绝缘体由 n 种材料组成;

δ_i ——槽内各种材料沿热流方向的等效厚度;

λ_i ——相应材料的平均导热系数。

1.3.3 异步电机的对流换热

本文分析的异步电机采用轴向强迫通风冷

却,定转子铁心分布有轴向通风孔,转子铁心端部安装有自扇冷风扇,是对流换热的主要方式。电机定转子轴向通风孔的表面散热系数主要取决于风速和通风孔的孔径与长度^[13],表达式为

$$\alpha_{as} = 44.9 \cdot \left(\frac{30}{l} \right)^{0.256} \cdot r^{0.088} \cdot \left(\frac{\omega}{10} \right)^{0.832} \quad (13)$$

$$\alpha_{ar} = 54.9 \cdot \left(\frac{30}{l} \right)^{0.256} \cdot r^{0.088} \cdot \left(\frac{\omega}{10} \right)^{0.832} \quad (14)$$

式中: α_{as} 、 α_{ar} ——定转子轴向通风孔的散热系数;

l ——通风孔长度;

r ——轴向通风孔的半径;

ω ——轴向通风孔内的风速。

本文的异步电机采用无机壳设计,定子铁心的外壁面对流换热系数 α ^[14]按经验公式式(15)计算。

$$\alpha = 9.73 + 14v^{0.62} \quad (15)$$

2 电机温度场计算

2.1 额定工况下稳态温度场计算及温升试验

2.2.1 额定工况下的稳态温度场计算

在 FLUENT 中加载了前述的载荷和边界条件后,入口风压取 2 kPa(相对大气压),电机各零部件稳态计算结果以及截面 $x=115.7$ mm 处温度分布,如图 4 所示。

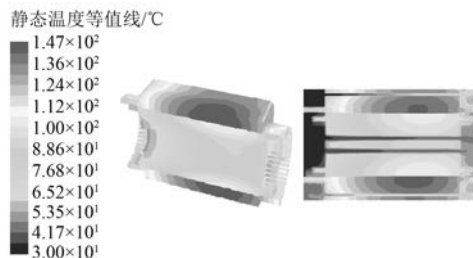


图 4 电机与 $x=115.7$ mm 截面处的温度分布云图

提取入口压力、出口压力、定转子通风孔及定转子端部空气的面域,绘制流场的轨迹线图,如图 5 所示,可以看出,电机定转子端部空气域为紊流,通风孔处风速较高。

2.1.2 额定工况下的温升试验验证

该电机采用无机座设计、定子铁心开通风孔、定子绕组端部环氧树脂密封、采用焊接铜条鼠笼转子等关键技术,保障了电机在频繁起停、过载、盐雾等对电机温升的苛刻要求,如图 6 所示。

在电机的定子三相绕组对应铁心出风口附近

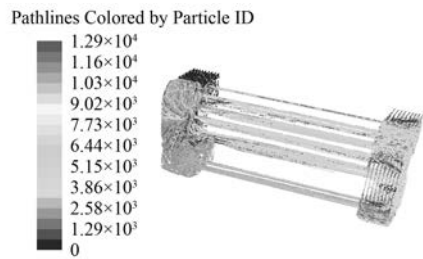


图 5 空气域轨迹流线图



图 6 环氧树脂灌封定子(左 1,左 2)与铸铜转子(右)

埋置了 PT100 铂热电阻温度传感器,通过 8 路温度巡检仪采集温度,进、出口测温采用红外热成像仪测量,电机温升试验平台分别如图 7、图 8 所示。额定工况下,其仿真测温点温度与试验温度对比,如表 3 所示。铁心轴向长度 700 mm,在铁心外壳表面长度方向上设置 4 个测温点,位置分别为 $L_a = 40\text{ mm}$, $L_b = 340\text{ mm}$, $L_c = 470\text{ mm}$, $L_d = 660\text{ mm}$ 。



图 7 红外热成像仪(左)及 8 路温度巡检仪



图 8 电机温升对拖试验平台

如图 8 所示,电机温度最高的位置位于靠近出风口的定子绕组,且最高温度在设计 H 级温升范围内。由表 3 可知,该仿真与试验数据对比,考虑面或体的温度梯度分布,仿真计算值取得平均值,除了在 L_a 处计算误差较大外,其他均在工程允许的误差范围内,与试验结果的数值及趋势有较好的吻合度,满足工程计算精度。

2.2 瞬态温度场计算

在额定负载工况下,定、转子从室温上升到各

表 3 定子绕组、定子铁心及进出风口温度
仿真值与测试值对比

零件或位置	仿真平均 温度/℃	试验监测 温度/℃	误差 百分比/%
L_a	97.4	84.5	15.2
L_b	138.2	133.0	3.7
L_c	144.3	141.0	2.3
L_d	132.6	127.0	4.4
定子绕组	158.0	152.4	3.6
进风口	32.9	31.0	6.2
出风口 1	76.8	74.0	3.8
出风口 2	76.4	72.8	4.9
出风口 3	73.9	70.6	4.6

自稳定的最高温度,温度随时间变化曲线如图 9 所示。由图 9 中可以看出,从电机起动状态达到温度稳定状态大约需要 3.3 h。

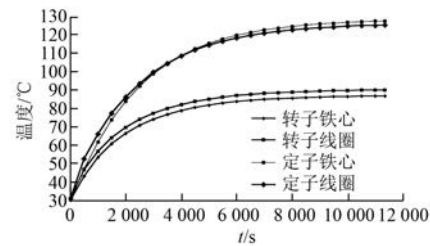


图 9 损耗元件平均温度随时间变化曲线

2.3 异步电机温度场影响因素分析

2.3.1 改变异步电机风道的入口风压

标准大气压 101.325 kPa、常温 15 ℃和绝对干燥环境下,空气单位体积重力 $\gamma = 0.012\ 018\text{ kN/m}^3$ 。在纬度 45°处,海平面上的重力加速度 $g = 9.8\text{ m/s}^2$,得到风速与风压的关系式

$$w = \frac{\gamma}{2g} v^2 = \frac{0.012\ 018}{2 \times 9.8} v^2 = \frac{v^2}{1\ 630} \text{ kN/m}^2 \quad (16)$$

通过改变离心风机的出口风压,即改变三相异步电机风道的入口风压,压力从 1~4 kPa 变化时,由式(16)也可以看出,增大异步电机的入口风压,即是增大入口风速,提高了对流换热系数。定子的最高温度由 168.2 ℃下降到 127.6 ℃,转子的最高温度从 126.7 ℃下降到 93.4 ℃,如图 10 所示。离心风机的出口风压不能无限制的增加,考虑成本、结构、噪声、安装方式等因素,本文选用了 ABB 的中压离心风机。

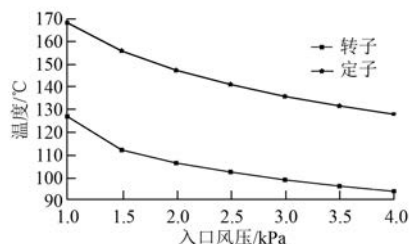


图10 定、转子最高温度随入口风压变化曲线

2.3.2 改变定子铁心通风孔的直径

定子铁心通风孔直径从 $\phi 16$ mm至 $\phi 31$ mm变化时,定子最高温度从 147 °C下降到 120.1 °C,转子最高温度从 106 °C下降到 97.6 °C,如图11所示。孔径的增大,实际增大了通风的散热面积,由式(13)、式(14)也可以看出,孔径的增大,实际增大了对流换热系数,同时孔径的增大还需满足定、转子的轭部磁密要求,避免铁心轭部磁密饱和。

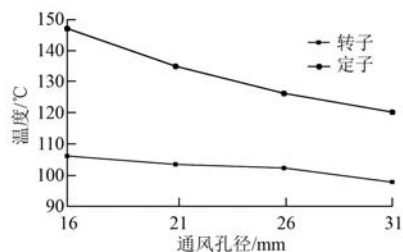


图11 定、转子最高温度随定子铁心通风孔径变化曲线

3 结 语

(1) 本文根据数值传热学相关理论,建立了温度场与流场耦合模型,进行了额定工况下稳态和瞬态的流固耦合分析以及影响电机温升的内外因素分析。通过温升试验的测量值与仿真计算值对比分析,仿真模型和温升数据可以较为准确地反映实际温度分布及趋势。

(2) 通过异步电机温度场、流场耦合分析,可以有针对性地优化电机的散热结构,比如在电机端部添加扰流板,让更多的风通过定子铁心;在保证定转子轭部磁密负荷情况下,增大定转子铁心的通风孔径,来增大对流散热面积;通过定子绕组、铁心温度传感器收集的温度数据,跟踪负载,实时地调整风压开关,控制风道入口压力;针对定子铁心和绕组中后段温度较高情况,添加径向通风槽道,通过采取上述措施,使得电机始终在温升

要求的范围之内可靠运行。

【参考文献】

- [1] KARL C, HABETLER T G, HARLEY R G, et al. Rotor temperature estimation of squirrel-cage induction motors by means of a combined scheme of parameter estimation and a thermal equivalent model [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(4): 1049-1056.
- [2] 温家斌, 孟大伟, 鲁长滨. 大型水轮发电机通风发热综合计算[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 115-119.
- [3] MAXIMINI M, KOGLIN H. Determination of the absolute rotor temperature of squirrel cage induction machines using measurable variables [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 34-39.
- [4] 谢颖, 辜承林. 笼型感应电动机三维全域温度场计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 96-101.
- [5] 邵永, 刘赵森. 感应电机全域三维瞬态温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 114-120.
- [6] 杨明发, 张培铭. 异步电动机定子全域三维温度场物理模型简化研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(S): 203-208.
- [7] 靳廷船, 李伟力, 李守法. 感应电机定子温度场的数值计算[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(5): 492-497.
- [8] 王艳武, 杨立, 陈翊, 等. 异步电机转子三维温度场及热应力场研究[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(6): 27-32.
- [9] 李伟力, 李守法, 谢颖, 等. 感应电动机定转子全域温度场数值计算及相关因素敏感性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(24): 85-91.
- [10] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [11] 魏永田, 孟大伟, 温嘉鑫. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [12] 鲍里先科 АИ, 丹科 ВГ, 亚科夫列夫 АИ. 电机中的空气动力学与热传递[M]. 魏书慈, 邱建甫, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [13] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [14] 黄国治, 傅丰礼. 中小旋转电机设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

收稿日期: 2017-02-20