

基于程序集成及响应面模型的电机冷却性能优化^{*}

李成功¹, 杨建玺¹, 王团锋², 王 帅³, 毛亚洲¹

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 苏州朗高电机有限公司, 江苏 苏州 215100; 3. 三一重机有限公司, 江苏 昆山 215300)

摘 要: 建立某 60 kW 电动汽车用永磁同步电机模型, 理论分析得到最佳流道条数以及流道参数取值范围。以冷却流道宽度 a 、高度 b 作为设计变量, 电机温升和流道进出口压差作为目标函数, 通过 Isight 集成网格变形软件 Sculptor 和 CFD 计算软件 Fluent, 应用拉丁超立方设计方法创建样本点, 并进行数据的自动提交仿真计算。根据得到的数据建立响应面模型, 采用多岛遗传算法对近似模型寻优。优化后, 电机温升和进出口压差分别下降了 6.01%、6.81%, 电机的性能和安全运行得到了保障。

关键词: 电机冷却; 温升; 压差; 程序集成; 响应面模型

中图分类号: TM 341:TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)10-0019-06

Optimization of Motor Cooling Performance Based on Program Integration and Response Surface Model^{*}

LI Chenggong¹, YANG Jianxi¹, WANG Tuanfeng², WANG Shuai³, MAO Yazhou¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Suzhou Lego Motors Co., Ltd., Suzhou 215100, China; 3. Sany Heavy Machinery Co., Ltd., Kunshan 215300, China)

Abstract: The model of a 60 kW permanent magnet synchronous motor for electric vehicles was established. The optimal number of flow channels and the range of flow channel parameters were acquired by theoretical analysis. The cooling channel width a and height b were taken as design variables, and the motor temperature rise and the inlet-outlet pressure difference were the objective functions. Through the Isight integrated mesh deformation software Sculptor and CFD calculation software Fluent, the sample points were created by using the Latin hypercube design method, and the data were automatically submitted for simulation calculation. Based on the obtained data, a response surface model was established, and the multi-island genetic algorithm was used to optimize the approximate model. After optimization, the motor temperature rise and inlet-outlet pressure difference were decreased by 6.01% and 6.81%, respectively. The performance and safe operation of the motor were guaranteed.

Key words: motor cooling; temperature rise; pressure difference; program integration; response surface model

0 引 言

电机作为电动汽车关键零部件, 既要保证多

典型工况下的输出转矩能力, 又要保证自身处于安全温度范围内。电机逐渐向高功率密度、小体积方向发展, 导致发热量问题严重。因此, 电动汽

^{*} 基金项目: 河南省科技攻关计划项目(162102210048)

作者简介: 李成功(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机冷却系统。

杨建玺(1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为密封与控制、精密制造技术等。

车电机散热成为影响电机性能的关键因素。

对于电机温升的计算,国内外主要采用简化公式法、等效热路法和数值解法。数值解法可以得到空间温度分布,国外 Kolondzovski 等^[1]运用多物理场耦合法对高速永磁电机进行了热分析。国内丁树业等^[2]采用流体场温度场耦合法对大型核主泵屏蔽电机温度场进行了求解。佟文明等^[3]采用螺旋型流道对电机的流体场和温度场进行了计算。丁树业等^[4]应用有限体积法,对变频供电情况下的永磁同步电机(PMSM)各部件的温升及流体流动进行了数值求解;刘蕾等^[5]对变功率工况下电机内关键部件的温升进行了分析。关于电机冷却方式和结构优化等方面,研究人员做过大量的工作,然而方法上均需要人工不断地 CAD 建模、剖分网格以及 CFD 的数值仿真。既花费大量时间在建模和剖分网格上面,又要依靠工程师进行冷却结构的优化,研发周期长、效率低,不具有流程化、模式化。

本文基于 Isight 优化集成和 Sculptor 网格变形技术,采用优化拉丁超立方试验设计方法选取样本点,自动修改得到高阶光滑连续高质量网格,对流道宽度和高度进行参数化和集成化。依据得到的响应数据建立响应面模型,并运用多岛遗传算法对流道参数优化,使温升和压差有显著下降。

1 电机散热模型

1.1 物理模型

本文的研究对象为 PMSM 冷却流道。该流道采用周向 Z 型结构,沿机壳圆周折返分布。电机全域模型如图 1 所示。电机的基本参数如表 1 所示。



图 1 电机全域模型

1.2 初始模型流固热耦合分析

电机冷却流道模型稳态计算的边界条件如

表 1 电机的基本参数

参数名称	参数值
额定功率 P_0/kW	60
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	2 000
定子外径 d_1/mm	262
定子内径 d_2/mm	306
定子长度 L/mm	296

表 2 所示。初始模型温度场和压力场分布如图 2 所示。

表 2 稳态计算边界条件

条件	具体设置
入口条件	入口速度 $v=0.54\text{ m/s}$, 温度 $55\text{ }^\circ\text{C}$
出口条件	出口压强 $p=101\ 325\text{ Pa}$
壁面耦合	界面, 流固热耦合
初始条件	以流体温度 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 进行初始化

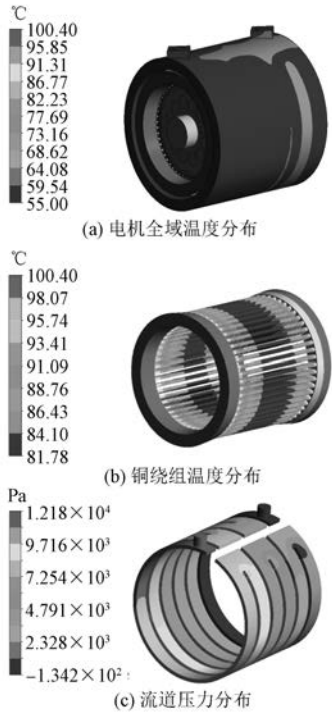


图 2 初始模型仿真分析

图 2(a) 中电机绕组端部温度最高为 $100.4\text{ }^\circ\text{C}$; 图 2(b) 中由于绕组端部散热条件不佳, 而绕组中部受冷却液作用, 散热较好, 造成绕组温度值沿轴向中间低两端高, 而沿径向由外向内呈现依次升高的分布特点; 图 2(c) 可以

看出,流道压强沿流道依次降低,且进出口压差最大达到12.18 kPa。

1.3 绕组温度变化趋势

额定工况下,电机绕组温度试验值和仿真值随时间变化曲线如图3所示。

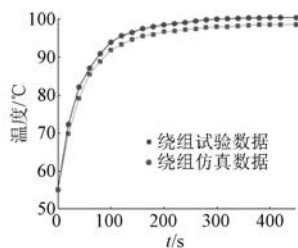


图3 绕组温度试验值与仿真值随时间变化曲线

通过对比试验和仿真时绕组的温度变化规律发现,试验和仿真绕组的最高温度分别 98.6 °C 和 100.4 °C,仿真温度比试验温度高 1.8 °C,相差较小,即仿真具有较好的参考价值。

1.4 流道条数的选择

冷却流道条数直接影响对流换热面积,从而影响冷却效果。因此,流道条数的选择是首要考虑的因素。

1.4.1 散热量

冷却液和壳体间对流换热带走的热量可由牛顿冷却公式计算:

$$\Phi = Ah_A \Delta T \quad (1)$$

式中: ΔT ——流道与流体的温差。

流道对流换热面积:

$$A = \frac{\pi D L_o - \pi D m + m L_o - 2m^2 - ma}{a + m} \cdot 2(a + b) \quad (2)$$

换热系数:

$$h_A = Nu \times \frac{\alpha}{d_e} = \frac{0.021 \cdot P_i^{0.8} \alpha \cdot Pr^{0.43} \cdot (a + b)^{0.2}}{(\rho \cdot c_p)^{0.8} \tau^{0.8} \cdot \Delta T^{0.8} \cdot 2^{0.2} ab} \quad (3)$$

式中: D ——流道中心直径;

L_o ——定子轴向长度;

m ——流道水隔壁厚;

a, b ——流道的宽度和高度;

Nu ——努塞尔数;

α ——水的导热系数;

Pr ——水的普朗特数;

ρ ——介质的密度;

c_p ——介质的比热;

τ ——介质的运动黏性系数。

1.4.2 流道压降

流道压降影响供水装置的功率,流道设计需综合压降对整车性能的影响。折返式流道压降由沿程和局部压降组成,可分别表示为

$$h_y = \lambda \frac{L_z}{d_e} \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

$$h_j = 2(n-1)\zeta \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

$$h_z = h_y + h_j \quad (6)$$

式中: h_y, h_j, h_z ——流道沿程压降、局部压降及总压降;

λ ——沿程阻力系数, $\lambda = 0.3164 / \text{Re}^{0.25}$;

Re ——雷诺数, $\text{Re} = v \cdot d_e \cdot \tau^{-1}$;

L_z ——沿程长度, $L_z = \pi D \frac{L_z - m}{a + m}$;

d_e ——当量直径;

v ——水的管径流速;

ζ ——局部阻力系数,取 0.8。

根据式(2)、式(3)绘制出换热面积 A 与换热系数 h_A 的乘积随 a, b 变化关系,如图4所示^[6]。可以看到,流道宽度 a 的影响远大于高度 b 的影响。综合考虑到电机机壳的机械强度因素,初步选取流道径向水封壁厚为 10 mm,此时 $b = 6$ mm。

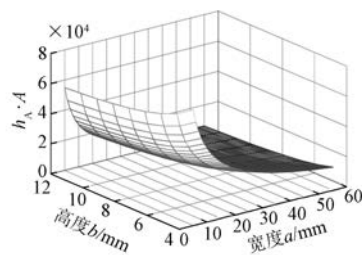


图4 换热系数和换热面积之积与 a, b 的关系

由式(3)、式(6)分别绘制出换热系数、流阻与宽度 a 的关系,如图5、图6所示。由图5、图6可见,宽度 a 处于 28~45 mm 之间时,散热效果较好,同时压降较小。

该电机流道条数 n 与流道宽度 a 关系为

$$n = \frac{L_o - \Delta L}{a + m} \quad (7)$$

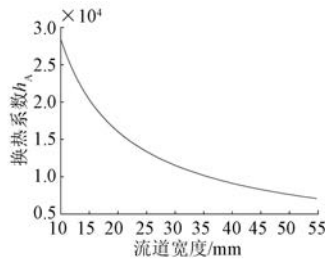


图5 换热系数 h_A 与流道宽度 a 关系

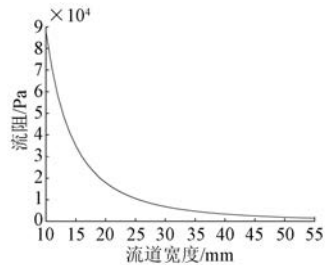


图6 流阻 h_z 与流道宽度 a 关系

式中： ΔL ——流道水隔宽度；
 m ——壳端部水封壁厚。

流道宽度 a 与流道数目 n 的关系如表 3 所示。

表 3 流道宽度与流道数目的关系

流道宽度/mm	30	36	41	44
流道数目/条	7	6	5	4

不同流道条数的稳态温度和压差如表 4 所示。

表 4 不同流道条数的稳态温度和压差

流道条数	4	5	6	7
温度/℃	103.5	101.2	100.4	100.8
压差/kPa	5.62	10.20	12.18	14.60

由表 4 可知,电机温度随流道条数的增加而有明显降低,流道数目为 6 时,温度为 100.4℃;进出水口压差随流道条数的增加而升高,流道数为 6 时,压差为 12.18 kPa,在允许范围内。由于电机几何结构的限制,导致工艺难度加剧和成本上升,流道数目取 6 较为合适。为了得到更加合理的流道参数,采用建立响应面模型的方法对周向 Z 字型水道进一步优化。

2 电机流道的参数化分析

由于仅研究流道截面参数对冷却效果的影响,为了节约计算成本,所以仅进行机壳、定子、铁心及流体的耦合模型分析,即可得优化的流道结构参数。

2.1 试验设计

在电机电磁结构已知的情况下,流道结构参数对于电机散热效果起关键作用,散热面积应尽可能大,且进出口压差应尽可能小,选择流道宽度 a 和高度 b 作为设计变量,选择电机温升和进出口压差作为目标函数。优化拉丁方法按照试验设计矩阵每列中各个水平出现的次序,可使矩阵中样本点的因子水平尽可能均匀分布。因此,该研究采用优化拉丁方法^[7]得到 32 组组合方案,列出 16 组,设计变量与响应值如表 5 所示。

表 5 设计变量与响应值

序号	流道宽度 a /mm	流道高度 b /mm	温度 T /℃	进出口压差 P /kPa
1	34.45	11.03	62.15	10.25
2	28.65	7.16	63.31	14.64
3	34.13	9.68	62.58	10.66
4	35.42	6.97	62.86	10.58
5	35.10	6.10	62.56	10.64
6	35.74	10.06	61.55	10.56
7	36.39	11.81	62.55	10.64
8	31.23	8.32	63.82	13.57
9	38.00	8.71	63.01	11.65
10	33.16	8.52	64.56	15.89
11	37.03	10.84	62.66	11.36
12	30.58	7.35	65.38	15.68
13	35.52	7.55	64.28	14.32
14	28.00	11.23	64.45	14.35
15	28.32	9.10	65.42	15.43
16	36.71	7.74	62.66	10.68

2.2 程序集成与响应面模型的建立

采用 Isight 集成网格变形软件 Sculptor、CFD 软件 Fluent,自动对 32 组样本调用计算。将表 5 设计变量 a 和 b 作为输入参数,由 Isight 集成 Sculptor 修改网格,通过 Fluent 仿真计算,得到每

组设计变量对应的响应值,如表 5 所示。

响应面法(RSM)充分应用在结构优化设计、可靠性分析中,基本思想是通过近似构造一个具有明确表达形式的多项式来表达隐式功能函数^[8]。二阶响应面模型式子由线性项二次项和交叉项组成,能准确描述目标函数与设计变量间关系。模型为

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{p < i} \sum \beta_{pi} x_p x_i \tag{8}$$

式中: x_i, x_p ——设计变量。

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{pi}$ 均为待定系数,其计算公式为^[9]

$$\begin{cases} \beta_0 = \frac{1}{k} \sum_j y_j = \bar{y} \\ \beta_i = \sum_j x_{ij} y_j / \sum_j x_{ij}^2 \\ \beta_{ii} = \sum_j x_{ij}^2 y_j / \sum_j (x_{ij}^2)^2 = \bar{y} \\ \beta_{pi} = \sum_j x_{pj} x_{ij} y_j / \sum_j (x_{pj} x_{ij})^2 \end{cases} \tag{9}$$

根据得到的 32 组样本结果,建立响应面模型。利用式(8)、式(9)分别得到温升和压差的二阶响应面模型方程:

$$y_{01} = 75.96 - 0.768x_1 + 0.939x_2 + 0.009x_1^2 - 0.045x_2^2 - 0.006x_1x_2 \tag{10}$$

$$y_{02} = 43.761 - 1.622x_1 + 0.935x_2 + 0.015x_1^2 - 0.086x_2^2 + 0.016x_1x_2 \tag{11}$$

2.3 优化结果

多岛遗传算法(MIGA)不要求求导和函数连续性,采用随机概率寻优的方式,自动地进行全局搜索,灵活的寻找规则,能很好地避免局部最优解。根据文献[10],通过增加算法的进化代数、种群规模和岛数,可提高 MIGA 的收敛精度,因此选择 MIGA 进行优化。优化结果如表 6 所示。

表 6 优化结果

变量	流道宽度 a/mm	流道高度 b/mm
数值	36	12
响应	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	进出口压差/ kPa
数值	62.13	10.58

优化结果与仿真(定子机壳绕组模型)的对比如表 7 所示。由表 7 可以看出,仿真值与响应

面优化最高温度相对误差为 2.08%,进出口压差的相对误差为 7.52%,而由于流体仿真压差的鲁棒性,压差出现小幅度波动,处于可以接受范围内,即响应面法得到的数据具有较好的参考价值。

表 7 优化结果与仿真的对比

参数	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	压差/ kPa
仿真值	63.45	9.84
响应面模型值	62.13	10.58
相对误差/%	2.08	7.52

3 试验

按照电机冷却流道结构优化得到的数据,进行试验分析,验证仿真分析结果的正确性。图 7 所示为试验台架及相关配套设备,包括温度传感器、SL06 型转矩转速传感器、供水装置(可控水温水压)等。试验结果表明,随着时间的推移,电机温度逐渐趋于稳定,定子铁心温度最高到达 94.36 $^{\circ}\text{C}$ 。

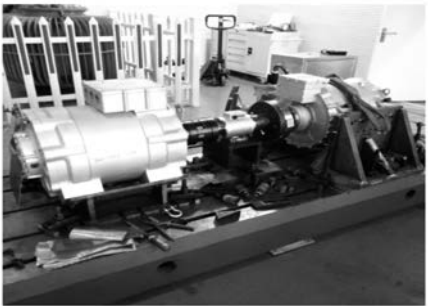


图 7 试验台架

进口水温、入口速度、压强出口值以及机壳外壁面散热条件等边界条件与初始模型仿真一致,根据上述得到的流道优化结果值,运用 Icem 剖分网格并进行全模型的仿真分析。优化后全模型的温度和压力分布云图如图 8 所示。由图 8(b)和图 8(c)可知,进出水口压差比初始模型明显降低,绕组温升明显改善,较好地提高了电机性能。

优化后试验与仿真结果的对比结果如表 8 所示。由表 8 可见,优化后的温度下降 6.01%,较好地保证了电机的安全运行;进出口压差比优化前下降 6.81%,压差处在允许的范围内,满足供水装置要求。

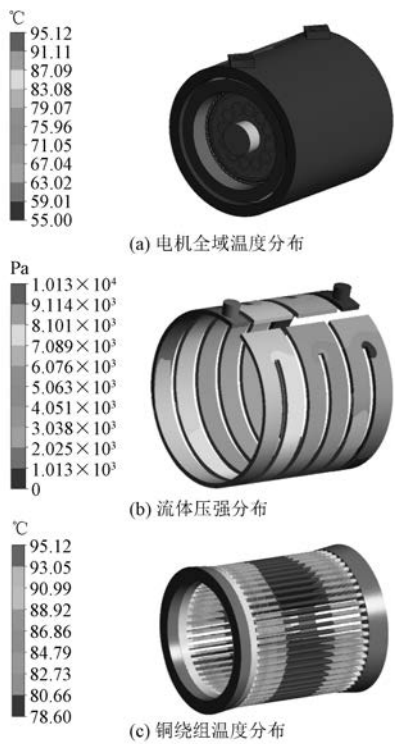


图 8 优化后的电机仿真结果

表 8 优化后仿真结果与试验结果对比

参数	最高温度/℃	压差/kPa
原模型仿真值	100.40	12.18
优化仿真值	95.12	10.13
试验值	94.36	11.35
优化百分比	6.01	6.81
相对误差	0.80	12.04

仿真和试验数值存在差异的原因:(1)电机三维模型局部特征简化造成的差异;(2)流道制造的误差以及测量仪器探头采集热源的误差。

总的来看,试验结果与仿真结果在误差允许范围内,CFD 仿真结果可作为电机冷却流道设计工作的参考。

4 结 语

以 1 台额定功率 60 kW 车用 PMSM 流道为研究对象,将流道宽度 a 和高度 b 作为设计变量,用优化拉丁方法得到样本点,建立响应面模型,得

出以下结论:

(1) 应用 Isight 优化平台集成 Sculptor 和 Flunet 仿真优化,并根据试验样本点数据建立响应面模型,代替实际模型进行分析,与传统仿真分析相比提高了计算效率。

(2) 在电磁结构确定的情况下,采用多岛遗传优化方法,得到流道宽度为 36 mm,高度为 12 mm 的优化方案,使温度下降 6.01%,压差下降 6.81%,保障了电机的安全运行。

(3) 通过 Isight 软件全局程序集成,提供了整体优化问题的解决方案。不仅可以得到理想的结果,而且可以提高设计工作效率,对电机流道结构设计具有一定的指导意义。

【参 考 文 献】

[1] KOLONCZOVSKI Z, BELAHCEEN A, ARKKIO A. Multiphysics thermal design of ahigh-speed permanent-magnet machine [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(13): 2693.

[2] 丁树业,孟繁东,葛云中.核主泵屏蔽电机温度场研究[J].中国电机工程学报,2012,32(36): 149.

[3] 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.

[4] 丁树业,郭保成,冯海军,等.变频控制下永磁同步电机温度场分析[J].中国电机工程学报,2014,34(9): 1368.

[5] 刘蕾,刘光复,刘马林,等.车用永磁同步电机三维温度场分析[J].中国机械工程,2015,26(11): 1438.

[6] 王淑旺,高月仙,谭立真.永磁同步电机温度场分析与水道结构优化[J].电机与控制应用,2016,43(7): 51.

[7] 陈魁.试验设计与分析[M].2 版.北京:清华大学出版社,2005: 5-28.

[8] 王永菲,王成国.响应面法的理论与应用[J].中央民族大学学报,2005,14(3): 236.

[9] 陈立周.稳健设计[M].北京:机械工业出版社,2000.

[10] 韩明红,邓家提.面向工程的优化算法性能实验研究[J].中国机械工程,2007,18(12): 1460.

收稿日期: 2019-06-19