

# 车用液冷机壳电机定子绕组热性能直接设计法<sup>\*</sup>

应红亮<sup>1,2</sup>, 黄苏融<sup>1</sup>

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;

2. 上海电驱动股份有限公司, 上海 201806)

**摘要:** 电动汽车驱动电机极力追求高密度轻量小型化, 不断推进电机的冷却散热与热传导技术的进步与发展。为此, 开展车用驱动电机的电-磁-热一体化设计方法研究, 通过构建一种工程化定子热路模型提出了定子绕组热性能直接设计法及其关键热参数, 并直接融入电磁设计中, 强化热性能设计的同时也弥补了传统电磁设计热负荷  $AJ$  值评估热性能的缺陷。通过快速评估电机的热传导能力和绕组温升, 可评估比较不同设计方案的热性能, 得到电-磁-热一体化设计的最佳解决方案, 从而提升电机持续运行的输出转矩。采用定子绕组热性能直接设计法, 改进设计了一台液冷机壳车用永磁同步驱动电机样机, 显著降低了定子绕组温升。样机温升试验验证了定子绕组热性能直接设计法及其关键热参数评估热性能的有效性。

**关键词:** 定子绕组热性能; 直接设计法; 热参数; 液冷机壳电机

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)06-0067-07

## Direct Approach to Thermal Performance Design of Electrical Machine Stator Winding with Liquid-Cooling-Housing<sup>\*</sup>

YING Hongliang<sup>1,2</sup>, HUANG Surong<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Edrive Co., Ltd., Shanghai 201806, China)

**Abstract:** Electric vehicle traction motor is in the pursuit of high density, small and light weight, which constantly promotes the cooling and heat transfer technology and the development of the motor. So electromagnetic-thermal co-design method of traction motor was researched. By constructing an engineering stator thermal circuit model, the direct design method of stator winding thermal performance and key thermal parameters were proposed and directly applied to the electromagnetic design, which strengthened thermal performance design as well as made up for the defect of assessing the thermal performance by thermal load value in the traditional electromagnetic design. Thermal performance of different designs could also be compared through the rapid assessment of motor heat transfer ability and winding temperature rise, thus, get the best solution of electromagnetic-thermal co-design and enhance output torque during the motor continuous operation. A permanent magnet synchronous motor with liquid-cooling-housing was optimized by the direct design method of stator winding thermal performance, which could significantly reduce the stator winding temperature rise. At last, the temperature rise experiment verified the effectiveness of the direct design method of stator winding thermal performance as well as the evaluation of the thermal performance by the key thermal parameters.

**Key words:** thermal performance of stator winding; direct design method; thermal parameter; motor with liquid-cooling-housing

<sup>\*</sup> 基金项目: 上海市产学研合作年度计划项目(沪 CXY-2015-014)

作者简介: 应红亮(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源汽车用永磁电机系统的设计。

黄苏融(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高效率高品质电机系统、电机设计与仿真分析、电机振动噪声与电磁材料服役行为等。

## 0 引言

电动汽车推动了电动汽车电机系统的高密度轻量小型化技术发展。为提高电机运行的能量密度,有效降低定子的温度,迫使电机高效冷却散热与热传导技术不断进步与发展。

车用电机设计多以电磁设计为核心,依据冷却散热结构方式,设计调整热负荷  $AJ$  值以控制电机的热流密度,致使电机设计中,需要反复进行电磁设计参数调整→电机特性与热性能校核计算→电磁设计参数再调整的重复校核计算。虽然这些大量重复性工作可由计算机及其设计软件完成,但纵观整个过程,车用电机的电磁设计始终处于主动优化,以减小电机损耗,降低电机温升;热工部分属于被动的设计方案热性能校核,热传导设计被弱化,致使大量时间消耗在电磁设计的参数调整及热性能校核计算中,设计效率较低。

电机热性能分析评估方法很多<sup>[1]</sup>,应用在车用驱动电机上的主要有两类:一类是利用电路原理等效模拟电机热源与散热能力的热路法或热路网络法;另一类则是有限元法。文献[2]基于 MATLAB/Simulink 仿真平台,搭建了一款车用液冷机壳内置永磁(Interior Permanent Magnet, IPM)电机集中参数热模型,实现了电机持续额定功率-短时峰值功率循环周期运行的电机温升曲线预测。文献[3]围绕基于永磁体观测器的车用 IPM 电机矢量控制系统的需求,采用 IPM 电机的集中参数热网络模型和双向磁网络模型,构建了基于 IPM 电机永磁体温度、交直流电流的多因素永磁体观测器,在线评估 IPM 电机永磁体的温度与抗退磁能力。文献[4]通过坐标变换简化集中参数热路模型,仅用 8 个线性差分方程就能计算电机的稳态及瞬态温升,并对三款异步电机进行了稳态和瞬态温升的计算,试验结果验证了其准确性。文献[5]使用了集中参数热路法的软件包对自然冷却的永磁伺服电机进行热分析,实现了稳态及瞬态温升性能的参数化分析。文献[6]用等效热路网络法简化了 IPM 电机定转子的热路结构,简化了热性能的计算。文献[7]采用集中参数热路法,完成车用水泵-电机-驱动集成系统设计的热性能分析,将热路法应用扩展到了系统层面。

有限元法及其多物理域仿真软件作为一种精

确的仿真计算验证工具已在电机设计领域得到广泛应用。文献[8]应用三维有限元法计算两台不同铁心长度的防爆电机,考虑定子绕组股间绝缘和不考虑定子绕组股间绝缘的定子三维温度场,并给出了可视化结果。文献[9]基于流体相似理论,建立了径向通风沟散热系数计算公式,结合三维有限元法计算及定子股间绝缘的定子温度场。文献[10]利用有限元法在模型中对绕组端部进行了分层等效,提高了绕组端部温升计算的准确性。

为使电磁设计计算的损耗与温升结果逼近实际情况,采用电磁-热的顺序耦合方式,不断循环假设定子绕组温度来计算电机损耗,完成电磁设计方案的性能分析及其温升计算校核。文献[11-12]基于有限元法电磁计算结果,采用电磁-热的顺序耦合方式,将损耗分布数据耦合到电机热路网络相应的节点,计算电机各部件的温度分布。文献[13-17]基于有限元法精确计算的特点,实现电磁-热的顺序耦合仿真,精确计算电机各部件的损耗分布和温度分布及其变化规律。文献[18]基于有限元法实现磁-热的直接耦合仿真,计算电机各部件损耗和稳态温度。文献[19]基于三维电磁场模型和温度场模型,实现磁-热-固的顺序耦合仿真,得到电机各部件的损耗-温度-热应力分布及其变化规律。

面对电动汽车驱动电机高密度轻量小型化发展目标的挑战,为提高车用驱动电机的冷却散热能力,提出液冷机壳结构、直接液冷电枢等散热冷却结构技术;同时强化电机绕组的热传导能力,如高密度绕组、绕组电加热浸渍固化工艺、绕组端部环氧灌封等低热阻热传导技术,推动着电动汽车驱动电机的高密度轻量小型化设计创新<sup>[20-23]</sup>。

本文围绕液冷机壳电动汽车驱动电机的电磁-热一体化设计需求,基于定子绕组热性能关键因子分析,构建工程化定子热路模型,由此提出定子绕组热性能直接设计法及其关键热参数,并直接融入电磁设计中,以强化热性能设计,弥补传统热负荷  $AJ$  值评估热性能的缺陷。

采用本文的定子绕组热性能直接设计法,对一款水冷机壳结构的永磁同步电机进行电-磁-热的一体化设计,以降低定子绕组温升。基于定子绕组关键热参数的分析,保持该电机的主要结

构尺寸与性能不变,重点改进该电机的绕组绝缘结构的热传导特性。将 24 槽/16 极分数槽集中绕组调整为 96 槽/16 极分布绕组,受定子总长度不变的制约,铁心轴向长度被缩短,电磁设计的热负荷  $AJ$  值略有增大;但是,电机定子槽数的增多及槽形尺寸的改变,绕组铜铁之间的热传导面积随之增大,绕组绝缘结构的传导热阻与铜耗热流密度也同步下降,最终定子绕组温升得以显著下降。样机的定子绕组温升试验结果和设计仿真分析结果非常吻合,验证了液冷机壳电机定子绕组热性能直接设计法及其关键热参数分析评估的有效性和准确性。

## 1 定子绕组热性能直接设计法

### 1.1 工程化设计的定子热路模型

基于电机设计方案的热性能分析评估需求,传统的等效热路法依据实际的定转子热路进行详细建模。图 1 所示的水冷机壳定子热路模型,将定子热路细分为齿顶、齿中、齿根和轭部等,并对定子槽内的绕组绝缘结构细化分层;精细化建模的优点是可精确地获取电机各部分相关节点的温度值,分析评估电机设计方案的热性能,但不便于电机绕组热性能的参数化设计分析。

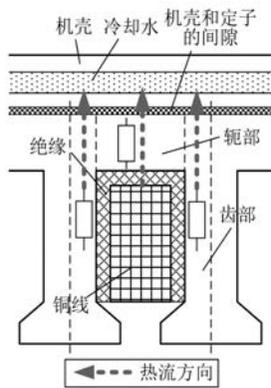


图 1 水冷机壳定子热路模型

基于电机的电-磁-热一体化设计的绕组热性能参数化设计分析需求,构建图 2 所示的液冷机壳工程化设计定子热路模型。依据热传导面积不变原则,将定子铁心等效为一个等腰梯形,保持定子铁心与机壳之间的热传导面积不变,绕组铜铁之间的热传导面积不变,定子铁心的齿轭面积与等腰梯形面积相等。定子槽内的绕组绝缘层、

绕组等效漆层组合的绕组绝缘结构,绕组铜导体分别简化为矩形,并与热传导面积一致。对比图 1 的液冷机壳定子热路模型,图 2 的液冷机壳工程化定子热路模型简化了定子铁心、绕组绝缘结构的热阻,由此将绕组铜耗热流到液冷机壳的三条热传导路径归并为一条。

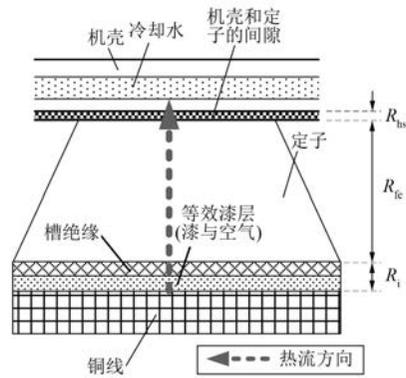


图 2 水冷机壳工程化定子热路模型

为得到图 3 所示的液冷机壳电机定子等值热路图,作如下假设:

- (1) 利用热路类似于电路模型的特点,用电路中的电压、电流、电阻符号代表实际热路中的温度、损耗、热阻;
- (2) 定子机壳水冷,水温恒定,其温度为  $U_w$ ;
- (3) 水的流动为紊流,对流传热热阻比较小,认为机壳温度和水温一致;
- (4) 定子和转子之间无热交换,定子上的铜耗、铁耗全部传递至定子机壳冷却水;
- (5) 机壳和定子铁心间的装配间隙热阻为  $R_{hs}$ ;
- (6) 忽略电机内部空气引起的对流散热;
- (7) 鉴于铁心良好的热传导特性,认为定子铁心的轭部和齿部间无温差,定子铁心热阻为  $R_{fe}$ ;
- (8) 定子槽内的绕组槽绝缘层、绕组等效漆层组合的绕组绝缘结构的热阻为  $R_i$ ;
- (9) 忽略绕组铜导体本身的热阻,认为槽内绕组铜导体和槽外端部绕组铜导体的温度相同;
- (10) 铁耗为  $I_{fe}$ ,铜耗为  $I_{cu}$ ,绕组铜导体温度为  $U_{cu}$ ;
- (11) 不考虑所有物体的热容,即只考虑电机定子的稳态温升;

(12) 只针对散嵌绕组电机, 拼块定子不适用。

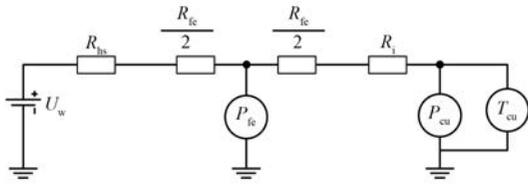


图3 水冷机壳电机定子等值热路图

图3中各热阻分别为

$$R_{hs} = \frac{L_{hs}}{k_{hs} \pi D_{os} L_t} \quad (1)$$

$$R_{fe} = \frac{2S_{fe}}{k_{fe} L_t (Z_s^2 L_s^2 - \pi^2 D_{os}^2)} \ln \frac{Z_s L_s}{\pi D_{os}} = \frac{L_{fe}}{k_{fe} L_t (Z_s L_s - \pi D_{os})} \ln \frac{Z_s L_s}{\pi D_{os}} \quad (2)$$

$$R_i = \frac{D_{sl}}{k_{sl} Z_s L_s L_t} + \frac{D_{ra}}{k_{ra} Z_s L_s L_t} = \left( \frac{D_{sl}}{k_{sl}} + \frac{D_{ra}}{k_{ra}} \right) \frac{1}{Z_s L_s L_t} \quad (3)$$

式中:  $L_{hs}, L_{fe}, D_{sl}, D_{ra}$  ——机壳和定子间的装配间隙, 定子铁心热路的等效长度, 绕组槽绝缘层的厚度, 绕组等效漆层的厚度;

$k_{hs}, k_{fe}, k_{sl}, k_{ra}$  ——机壳和定子间间隙、定子铁心、绕组槽绝缘层、绕组等效漆层的导热系数;

$Z_s$  ——定子槽数;

$L_s, L_t$  ——每个槽的周长, 铁心长度;

$D_{os}$  ——定子铁心外径。

由图3液冷机壳电机定子等值热路图, 直接得到定子绕组铜导体温度计算式:

$$U_{cu} = U_w + \Delta U_{hs} + \Delta U_{fe} + \Delta U_i = U_w + R_{hs}(I_{fe} + I_{cu}) + R_{fe} \left( I_{cu} + \frac{I_{fe}}{2} \right) + R_i I_{cu} \quad (4)$$

### 1.2 绕组温度的关键热参数

分析式(4), 由于铁心热导率高, 铁心温差  $\Delta U_{fe}$  就比较小; 液冷机壳定子绕组温度  $U_{cu}$  主要取决于机壳水温  $U_w$ 、机壳和定子铁心的间隙温差  $\Delta U_{hs}$ 、绕组绝缘结构温差  $\Delta U_i$ , 其中绕组绝缘结构温差  $\Delta U_i$  包括绕组槽绝缘层温差和绕组等效漆层温差两部分。

一般而言, 机壳和定子铁心的间隙值取决于机壳和铁心制造的工艺水平, 此间隙的静止空气层热导率很低, 且全部热量通过这个间隙流向冷却水。该间隙温差  $\Delta U_{hs}$  的设计控制参数是总热流密度。受绝缘材料本身的绝缘性能与机械性能制约, 绕组槽绝缘层的热导率比较低, 厚度不能过薄; 绕组槽绝缘层温差的设计控制参数是铜耗热流密度, 即铜耗及铜线与铁心之间的热传导面积。绕组等效漆层的热导率也比较低, 它取决于浸渍漆导热性能及漆在槽内的填充率; 绕组等效漆层厚度涉及因素比较多, 包括槽数、槽形尺寸、槽满率和漆包线的漆膜厚度等; 绕组等效漆层温差的主要设计控制参数是绕组等效漆层厚度与铜耗热流密度。

考虑到铁心温差  $\Delta U_{fe}$  较低略去后, 进一步简化式(4)可得到式(5):

$$U_{cu} = U_w + \Delta U_{hs} + \Delta U_{fe} + \Delta U_i \approx U_w + \frac{L_{hs}}{k_{hs}} \frac{I_{cu} + I_{fe}}{\pi D_{os} L_t} + \left( \frac{D_{sl}}{k_{sl}} + \frac{D_{ra}}{k_{ra}} \right) \frac{I_{cu}}{Z_s L_s L_t} \quad (5)$$

在式(5)中将一些固定的材料、工艺参数提取后, 将三项热性能设计控制参数定为关键热参数, 以引导定子绕组热设计。其一是总热流密度  $q_{hs}$ , 其二是铜耗热流密度  $q_{cu}$ , 其三是绕组等效漆层厚度  $D_{ra}$ , 如式(6)~式(8)所示。

$$q_{hs} = \frac{I_{fe} + I_{cu}}{\pi D_{os} L_t} \quad (6)$$

$$q_{cu} = \frac{I_{cu}}{Z_s L_s L_t} = \rho A J \frac{\pi D_{is} L_h}{Z_s L_s L_t} \quad (7)$$

$$T_{ra} = \frac{S_{slot} - S_{sl} - S_{cu}}{L_s} \quad (8)$$

式中:  $S_{slot}, S_{sl}, S_{cu}$  ——槽面积, 槽内绝缘纸面积, 槽内纯铜的面积;

$L_h$  ——导体平均半匝长度;

$D_{is}$  ——定子铁心内径。

将式(6)~式(8)代入式(5)后, 可得到式(9):

$$U_{cu} \approx U_w + \frac{L_{hs}}{k_{hs}} q_{hs} + \left( \frac{D_{sl}}{k_{sl}} + \frac{D_{ra}}{k_{ra}} \right) q_{cu} \quad (9)$$

式(6)~式(9)表明, 电机定子绕组稳态温度  $U_{cu}$  的直接设计预测值由三项关键热参数设计控制。相对于传统电磁设计的热负荷  $AJ$  仅表明铜耗热源, 而这三项关键热参数有效地引导定子绕

组热性能设计。其中总热流密度  $q_{hs}$  综合了两种主要损耗热流;铜耗热流密度  $q_{cu}$  则包含了热负荷  $AJ$  和绕组铜铁之间的热传导面积  $Z_s L_s L_t$ , 相同的电磁设计热负荷  $AJ$ , 设计改变定子槽数、槽周长即可调整铜耗热流密度  $q_{cu}$ ; 绕组等效漆层厚度  $D_{ra}$  则综合等效了铁心与绕组热传导结构的尺寸形状-材料-工艺各种效应后的热传导路径长度, 包括槽数、槽形尺寸、槽满率、绝缘纸的材料厚度、漆包线漆膜的厚度等。显而易见, 将定子绕组热性能直接设计法融入车用驱动电机电磁设计中, 优化绕组绝缘热传导结构, 设计控制总热流密度、绕组铜耗热流密度  $q_{cu}$  和绕组等效漆层厚度  $D_{ra}$ , 可直接设计预测绕组绝缘结构温差  $\Delta U_i$  和绕组稳态温度  $U_{cu}$ 。

在车用驱动电机的电-磁-热一体化设计中, 设计者以这三项关键热参数为热性能设计控制参数, 可直接设计预测电机各种工况的稳态温升, 优化定子绕组热性能设计方案。依据给定的电机最高温度, 还可设计预测电机的最大持续工作区域。

## 2 液冷永磁同步电机的热性能优化

车用驱动电机热设计的基本三要素如下: (1) 选择合适的冷却散热结构方式, 确保电机内的热量充分散出; (2) 优化电磁设计, 减小电机损耗, 降低电机的总热流密度  $q_{hs}$ ; (3) 合理设计布置热传导结构, 降低热阻和热流密度, 减小电机内的热传导温差。基于液冷机壳永磁同步电机 (24 槽/16 极) 的三项关键热参数分析, 造成定子绕组温度过高的主要原因是铜耗热流密度  $q_{cu}$  偏高, 以及绕组等效漆层厚度过大。因此, 增多定子槽数、调整槽形设计, 减小铜耗热流密度  $q_{cu}$  和绕组等效漆层厚度  $D_{ra}$ , 以降低绕组绝缘结构温差  $\Delta U_i$  值, 最终降低定子绕组温度  $U_{cu}$  值。

### 2.1 主要设计参数对比

电机主要性能指标如表 1 所示。

表 1 电机主要性能指标

| $T_N /$<br>(N·m) | $T_{pk} /$<br>(N·m) | $P_N /$<br>kW | $P_{pk} /$<br>kW | $n_N /$<br>(r·min <sup>-1</sup> ) | $n_{pk} /$<br>(r·min <sup>-1</sup> ) | $U_N /$<br>V |
|------------------|---------------------|---------------|------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| 240              | 500                 | 40            | 65               | 1 600                             | 2 500                                | 336          |

保持电机体积、转子结构和内外径尺寸不变, 降低铜耗热流密度  $q_{cu}$  与绕组等效漆层厚度  $D_{ra}$  最

有效的方式就是增大绕组热传导面积  $Z_s L_s L_t$  值; 将 24 槽/16 极的分数槽集中绕组改变为 96 槽/16 极的分布绕组, 如图 4 所示。

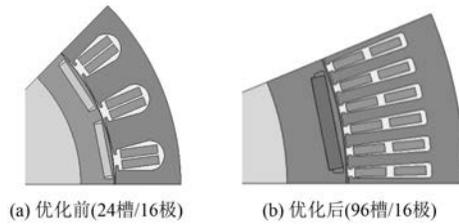


图 4 两电机方案的 2D 截面图

定子绕组热性能优化前后的电机设计参数如表 2 所示。优化后的 96 槽/16 极绕组端部更长, 铁心则更短, 导致热负荷  $AJ$ 、绕组铜耗  $I_{cu}$  和总热流密度  $q_{hs}$  都增大。但是, 绕组热传导面积  $Z_s L_s L_t$  值增大 3 倍。得益于此, 铜耗热流密度  $q_{cu}$  和绕组等效漆层厚度  $D_{ra}$  显著减小, 致使绕组绝缘温差  $\Delta U_i$  降低 71.2 K, 最终定子绕组温度  $U_{cu}$  降低 65.3 K。

表 2 两电机的设计对比 (额定功率, 50 °C 冷却水)

| 参数  | 优化前     | 优化后     | 优化后<br>优化前 |
|---|---------|---------|------------|
| $D_{os} / \text{mm}$                            | 368     | 368     | 1          |
| $L_t / \text{mm}$                               | 96      | 80      | 0.83 ↓     |
| 定子总长/mm   | 140     | 140     | 1          |
| $Z_s$   | 24      | 96      | 4.0 ↑      |
| $Z_s L_s L_t / \text{cm}^2$                     | 1 843.2 | 5 570.4 | 3.0 ↑      |
| $I_{cu} / \text{W} (75 \text{ °C})$             | 364.6   | 602.6   | 1.65 ↑     |
| $I_{fe} / \text{W}$                             | 359     | 702     | 1.96 ↑     |
| $A / (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$            | 34.84   | 40.41   | 1.16 ↑     |
| $J / (\text{A} \cdot \text{mm}^{-2})$           | 4.0     | 4.84    | 1.21 ↑     |
| $AJ / (\text{A}^2 \cdot \text{m}^3 \cdot 10^6)$ | 139.4   | 195.6   | 1.40 ↑     |
| $q_{hs} / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$      | 0.64    | 1.41    | 2.20 ↑     |
| $q_{cu} / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$      | 0.18    | 0.11    | 0.61 ↓     |
| $D_{ra} / \text{mm}$                            | 2.7     | 1.2     | 0.44 ↓     |
| $\Delta U_i / \text{°C}$                        | 101.9   | 30.7    | 0.30 ↓     |
| $U_{cu} / \text{°C}$                            | 158.9   | 93.6    | 0.59 ↓     |

一般而言, 热负荷  $AJ$  乘积正比于铜耗, 并与稳定温升呈线性关系。但是, 表 2 两台液冷机壳高密度电机热性能对比数据证实了总热流密度  $q_{hs}$ 、铜耗热流密度  $q_{cu}$  和绕组等效漆层厚度  $D_{ra}$  三个关键热参数设计控制定子热性能的功能与效

应,仅依据  $AJ$  值已无法设计预测液冷机壳高密度电机温升,必须同时合理设计布置绕组绝缘热传导结构,控制  $q_{cu}$  和  $D_{ra}$ ,才可有效地降低绕组绝缘温差  $\Delta U_i$ ,最终控制定子绕组温度  $U_{cu}$ 。

定子绕组直接设计法及其三个关键热参数,不仅可直接融入电动汽车驱动电机的电-磁-热一体化设计,设计预测定子绕组热性能,包括绕组绝缘热传导结构、绕组绝缘温差  $\Delta U_i$  和定子绕组温度  $U_{cu}$ ,快速得到电机的稳态温升;同时,作为一种电机热性能实用的评价方法,基于关键热参数能快速评估不同电机设计方案的热性能,解决了不同电机设计方案热性能比较的难题。

### 2.2 温升性能的试验对比

通过优化,电机绕组的温升情况得到了明显改观。图 5 是优化前后电机的温升试验情况以及与预测结果的对比。图 6 是电机的台架照片。从图 5 的实测数据与预测结果的对比来看,定子简化热路法及相关公式的计算数据与实测结果的吻合度非常好,其精确性及有效性得到了非常好的验证。

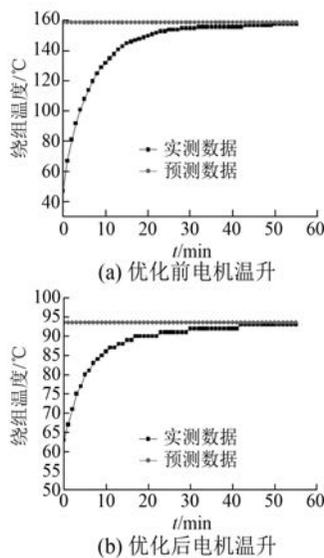


图 5 两电机的额定工况温升试验结果

## 3 结 语

电机绕组热性能直接设计法的理念是基于电机的热性能目标,在电机设计中直接融入电机绕组热性能设计及其热性能参数评估,实现车用驱动电机的电-磁-热一体化设计分析。通过构建

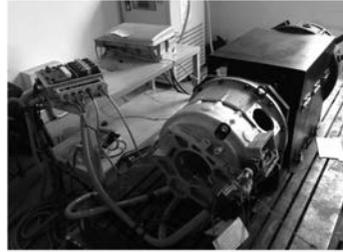


图 6 样机与其试验台架

工程化定子热路,提出了基于液冷机壳电机的绕组热性能直接设计法及其关键热参数,其主要特点如下:

(1) 绕组热性能直接设计法提供了一个快速设计预测电机热性能的工具,有效地将热性能设计融入到车用电机电磁设计中。补充目前仿真功能丰富的电机设计软件的相关设计功能。

(2) 传统电磁设计热负荷  $AJ$  乘积是一个间接热参数,不能直接进行热设计,必须借助热网络法或有限元法完成电磁设计方案的温升计算校核;因此,热设计效率低下,难以实现热设计优化。定子绕组热性能直接设计法,以关键热参数  $q_{hs}$ 、 $q_{cu}$  和  $D_{ra}$  为热性能主要设计控制参数,便于融入车用驱动电机的电-磁-热一体化设计。

(3) 作为一种实用的电机热性能设计评估工具,关键热参数综合电机定子本身的设计参数、材料、制造工艺等,能快速评估不同电机设计方案的热性能,计算运行区域内所有工作点的稳定温升与温度 MAP 图。

采用热性能直接设计法优化了一台液冷的永磁同步电机,试验温升结果验证了热性能直接设计法和关键热参数的有效性。

### 【参考文献】

[ 1 ] 李和明,李俊卿.电机中温度计算方法及其应用综述[J].华北电力大学学报,2005,32(1): 1-5.  
 [ 2 ] 王爱元,黄苏融,贡俊.应用集中参数热模型的高密度 IPM 电机运行过程的热仿真[J].微特电机,2004,32(8): 5-7.  
 [ 3 ] 师巍.高密度永磁电机永磁体防退磁技术的研究[D].上海:上海大学,2013.  
 [ 4 ] MELLOR P H, ROBERTS D, TURNER D R. Lumped parameter thermal model for electrical machine of TEFC design [ J ]. Electric Power

- Applications, IEE Proceedings-B, 1991, 138 (5): 205-218.
- [ 5 ] STATON D A, SO E. Determination of optimal thermal parameters for brushless permanent magnet motor design [ C ] // Industry Applications Conference, 33th IAS Annual Meeting, 1998: 41-49.
- [ 6 ] KIM D J, JUNG J W, KWON S O, et al. Thermal analysis using equivalent thermal network in IPMSM [ C ] // International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2008: 3162-3165.
- [ 7 ] HARRIS N C, JAHNS T M, HUANG S R. Design of an integrated motor/controller drive for an automotive water pump application [ C ] // Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting, 2002: 2028-2035.
- [ 8 ] 李伟力, 宋凯, 付敏, 等. 用三维有限元计算大中型异步电动机定子三维温度场 [ J ]. 黑龙江大学自然科学学报, 1999, 16(2): 33-36.
- [ 9 ] 李伟力, 付敏, 周封, 等. 基于流体相似理论和三维有限元法计算大中型异步电动机的定子三维温度场 [ J ]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 33-36.
- [ 10 ] 李立毅, 张江鹏, 闫海媛, 等. 高功率密度永磁电动机散热设计及热场分析 [ J ]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3642-3650.
- [ 11 ] ALMANDOZ G, POZA J, RODRIGUEZ M A, et al. Co-simulation tools for the permanent magnet machine design oriented to the application [ C ] // The International Conference on Computer as a Tool, 2007: 1687-1693.
- [ 12 ] MOMEN M F, HUSAIN I. Optimizing the design and performance of a switched reluctance machine using lumped parameter thermal model [ C ] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003: 955-961.
- [ 13 ] TENCONI A, PROFUMO F. Temperatures evaluation in an integrated motor drive for traction applications [ J ]. IEEE transactions on Industry Electronics, 2008, 55(10): 3619-3626.
- [ 14 ] FAN J X, ZHANG C N, WANG Z F, et al. Thermal analysis of water cooled surface mount permanent magnet electric motor for electric vehicle [ C ] // International Conference on Electrical Machine and Systems (ICEMS2010), 2010: 1024-1028.
- [ 15 ] POLIKARPOVA M, RÖYTTÄ P, ALEXANDROVA J, et al. Thermal design and analysis of a direct-water cooled direct drive permanent magnet synchronous generator for high-power wind turbine application [ C ] // International Conference on Electrical Machine (ICEM2012), 2012: 1488-1495.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 邹继斌, 张洪亮, 江善林, 等. 电磁稳态条件下的力矩电机三维暂态温度场分析 [ J ]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 66-70.
- [ 18 ] 黄允凯, 胡虔生, 朱建国. 顾及旋转铁耗的高速爪极电机三维磁热耦合分析 [ J ]. 电工技术学报, 2010(5): 54-60.
- [ 19 ] 谢颖, 王泽, 单雪婷, 等. 基于多场量的笼型感应电机三维瞬态磁热固耦合计算分析 [ J ]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3076-3084.
- [ 20 ] 黄苏融, 贡俊, 谢国栋, 等. 机电一体化液冷式电机: 03151198.8 [ P ]. 2006-07-19.
- [ 21 ] 黄苏融, 张琪, 谢国栋, 等. 直接液冷和热屏蔽的三明治结构电机电枢: 201010291003.7 [ P ]. 2012-07-04.
- [ 22 ] 贡俊, 杨锬, 唐名钟, 等. 水冷定子机座电机的绕组绝缘与导热结构: 200320122494.8 [ P ]. 2005-01-26.
- [ 23 ] 贡俊, 杨锬, 唐名钟, 等. 电机水冷机座电机的水密封结构: 200320122496.7 [ P ]. 2005-01-26

收稿日期: 2017 -04 -10

中文核心期刊      中国科技核心期刊      中国学术期刊(光盘版)  
 全国优秀科技期刊      华东优秀科技期刊  
 中国科学引文数据库来源期刊      中国学术期刊综合评价数据库来源期刊