

# 基于热网络的全封闭风冷永磁电机温升分析

吴江权<sup>1</sup>, 梁进学<sup>2</sup>, 杨金霞<sup>1</sup>, 李华湘<sup>1</sup>, 陈致初<sup>1</sup>

(1. 中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001;  
2. 武汉地铁集团有限公司 武汉地铁运营公司, 湖北 武汉 430030)

**摘要:** 全封闭风冷永磁牵引电动机功率密度高、内部散热条件恶劣, 对电机热设计和温升控制提出了较高要求。研究了热网络方法在电机温升分析中的应用, 对一款全封闭风冷永磁电机构建热网络模型, 并基于MATLAB/SIMULINK平台编程计算热网络参数, 实现了对电机内部温升计算和热分析的快速响应。与试验结果对比发现, 热网络方法温升计算结果具有较高准确性, 能满足电机工程设计需要, 对电机热设计具有工程指导意义。

**关键词:** 永磁同步电机; 热网络; 热分析; 温升控制; 温升计算

**中图分类号:** TM351      **文献标识码:** A

**doi:** 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.05.003

## Thermal Analysis of Air-cooled Enclosed PMSM Based on Thermal Network

WU Jiangquan<sup>1</sup>, LIANG Jinxue<sup>2</sup>, YANG Jinxia<sup>1</sup>, LI Huaxiang<sup>1</sup>, CHEN Zhichu<sup>1</sup>

(1. CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China;  
2. Wuhan Metro Operation Co., Ltd., Wuhan Metro Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430030, China)

**Abstract:** For the high power density and poor heat dissipation condition, much attention was paid on thermal design of air-cooled enclosed PMSM. The application of the thermal network method in the analysis of temperature rise of PMSM was investigated. A thermal network model was presented for a certain PMSM, and its thermal parameters were calculated based on MATLAB/SIMULINK. With the thermal network, rapid calculation of thermal performance of PMSM could be achieved. Compared with experimental results, the thermal network proved higher accurate for design, and had guiding significance to the thermal design of PMSM.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor(PMSM); thermal network; thermal analysis; temperature rise control; temperature calculation

## 0 引言

永磁同步牵引电动机具有功率密度高、节能等优点, 已在轨道交通、电动汽车、船舶等领域得到越来越多的应用。

为防止灰尘、铁屑等异物进入电机内或吸附在永磁转子上, 要求永磁电机采用全封闭结构。尽管全封闭结构可减少永磁电机的维护量, 但会导致电机特别是风冷电机的散热条件(尤其是线圈端部)较差, 电机很容易成为等温体。过高的温度会引起电机局部温

度高、绝缘材料失效、永磁体退磁。因此温升问题给大功率高密度的全封闭永磁电机的开发提出了巨大挑战。国内外对永磁电机的温升预估进行了大量的研究工作。在轨道交通领域, 文献[1]采用热网络方法和二维数值模拟的方法研究了永磁同步牵引电机转子温度场分布, 文献[2]采用热网络方法研究了永磁同步牵引电机整体的温升特性, 文献[3]采用数值仿真的方式对永磁牵引电机内部温度场分布进行了计算。在电动汽车领域, 文献[4]采用流固耦合仿真的方式对车用永磁电机内部温升进行了分析, 文献[5]对车用永磁电机构建热网络模型计算内部温度分布, 文献[6]分别采用热网络和数值仿真的方式对车用永磁电机温升进行了研

究。在工业应用领域, 文献 [7] 构建热网络计算了电机各部分温升, 文献 [8] 则采用热网络方法对永磁无刷直流电机进行了温升分析。

目前, 电机热分析的常用方法主要有 3 种: 简单公式法<sup>[9]</sup>、等效热网络法<sup>[6, 8, 10]</sup>和有限元分析方法<sup>[3-4]</sup>。简单公式法模型简单、计算快, 但计算偏差往往较大, 只能在设计初期进行简单温升预测。有限元分析方法可以对任意几何形状电机进行建模分析, 在 3 种方法中准确度最高, 能得到详细的电机局部温升状况, 但往往模型较为复杂, 计算量大, 分析周期长。等效热网络方法可以根据实际情况决定热网络的疏密及节点位置, 其温升预测准确度较高, 应用简单方便, 同时可以直观反映电机内各部位热阻分布情况, 便于设计人员迅速找到散热优化方向。

本文以一款全封闭强迫风冷永磁同步牵引电动机为研究载体, 构建热网络模型, 并基于 MATLAB/SIMULINK 平台编写了电机局部热阻计算程序, 通过电机关键参数的输入, 即可求解电机内部各节点温升。通过与试验结果的对比, 验证了等效热网络分析方法的准确性。

## 1 热网络模型的建立

### 1.1 电机热网络简介

电机内部结构复杂, 热源分散, 热量传递路径多样。等效热网络方法是将电机损耗热源集中在各个离散的节点上, 节点间通过热阻连接, 然后根据电机内部热量传递的方向及路径建立网络拓扑, 将电机内温度场转化为带有集中参数的热路的一种热分析方法。

热网络方法求解速度快, 但热阻计算需要依赖经验公式, 制约了其热分析的准确性。一般而言, 计算程序经调试之后, 该方法对同类型电机热分析准确性能够满足工程应用需要, 且能直观反映电机内部热量的传递关系。

### 1.2 样机热网络模型

本文研究的永磁电机样机主要包括定子、转子、端盖、轴承和转轴等部件, 永磁体嵌装在电机转子内, 定子上嵌有扁铜线绕组 (如图 1 所示)。

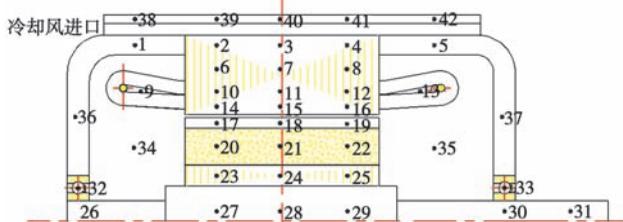


图 1 电机结构及热网络节点划分

对样品电机建立热网络模型时, 作如下假设:

- ①电机在圆周方向的热源和冷却条件相同;
- ②电机内部两侧的空腔中, 各点的空气温度相同;
- ③电机杂散损耗部分集中于定子齿部。

根据以上原则, 将样机用正交网格进行划分, 铁心区域按轴向等分为 3 段, 每个网格中心作为该区域的节点。定子沿径向分为齿部和轭部各 3 个节点, 绕组除直线段 3 个节点以外, 两端伸出部分各 1 个节点。转子则沿径向分为转子上层、永磁体、转子下层, 分别划分节点。转轴、轴承、机座上的节点划分如图 1 所示。

电机为全封闭风冷结构, 内部损耗产生的热量先传导到定子铁心通风孔或通过机内空气对流传递到端盖表面, 继而散逸到冷却空气或外部环境之中。冷却空气由电机进风口进入电机腔后, 经电机非传动端端盖引流进入定子铁心上的通风孔, 之后再经传动端端盖上的出风口后流出。根据电机传热路径, 图 1 中样机温度场节点的等效热网络如图 2 所示。其中, 定子轭部 (节点 6-8)、绕组 (节点 9-13)、定子齿部 (节点 14-16)、转子上层 (节点 17-19)、永磁体 (节点 20-22)、转子下层 (节点 23-25) 和转轴 (节点 32-33) 上有损耗存在, 为有源节点, 其他节点则为无源节点。

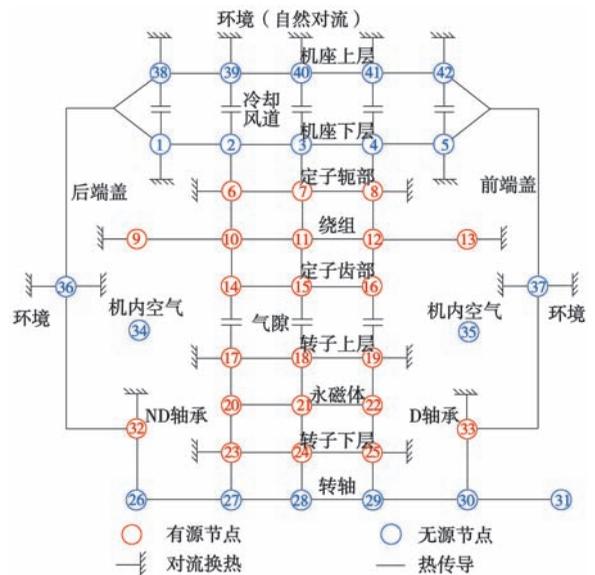


图 2 电机等效热网络图

## 2 热源分析与热阻计算

### 2.1 热网络模型热源分析

温升与损耗的大小和分布关系密切。在热网络模型中, 对损耗的加载的计算和处理方式:

①定子线圈槽内损耗包括两个部分: 集肤效应的基波电流所产生的损耗; 集肤效应逆变器谐波所产生的附加损耗。

②定子线圈端部损耗: 定子线圈端部的损耗组成部分同槽内损耗相同, 但在线圈端部不存在集肤效应, 故该部分损耗不考虑集肤效应。

③定子铁心齿部和轭部铁耗: 考虑逆变器供电的齿部和轭部铁耗, 根据电磁仿真分析得到。

④机械损耗的处理: 根据文献 [6] 的研究, 机械损

耗一半加载在定子齿部,其余分别加载在传动端轴承和非传动端轴承上。

⑤永磁体损耗:根据电磁仿真计算得出,均匀加载在永磁体上。

⑥转子铁耗:转子铁耗主要是由定子开槽和逆变器引入谐波引起,根据电磁仿真计算得出。

根据以上分析和电磁计算结果,将各部分损耗作为热源加载到热网络对应的有源节点中。

## 2.2 热阻计算

### 2.2.1 概述

在图2中,电机内各节点间根据内部传热路径通过热阻连接起来,形成网络系统,继而通过节点间能量流动的平衡来求解各节点温度。由于电机运行温度并不高( $<400^{\circ}\text{C}$ ),热辐射散热比例不大,故在热阻计算时不考虑辐射传热热阻<sup>[8]</sup>。

电机内部节点主要通过热传导热阻连接,对于轴向导热,如转轴、永磁体、定子、机座上各个节点间的轴向导热,热阻计算公式为

$$R_{ca}=\delta/(\lambda \cdot A) \quad (1)$$

式中: $\delta$ 为节点间距离; $A$ 为传热横截面积; $\lambda$ 为材料在导热方向上的导热系数。

对于径向节点间导热,模型可视为同心圆筒内外圆柱面间的导热,如转轴与转子下层间导热、转子下层与永磁体间导热、转子下层与转子上层间导热、永磁体与转子上层间导热、定子齿部与轭部间导热、定子轭部与机座间导热以及端盖与轴承间导热。热阻计算公式为

$$R_{cr}=\frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot l} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2)$$

式中: $l$ 为圆筒高度; $r_1$ 、 $r_2$ 分别为圆筒内、外径; $\lambda$ 为材料在径向导热方向上的导热系数。

端盖、铁心、绕组端部等部件的节点与机内空气存在对流换热,而风道、端盖、轴承等部件与冷却空气间强迫对流散热。不同种类及冷却型式的电机的对流散热计算并不通用。对流换热热阻计算式为

$$R_d=1/(h_f \cdot A) \quad (3)$$

式中: $h_f$ 为冷却介质与壁面间对流换热系数; $A$ 为散热面积。

热网络模型中大部分热阻通过以上方式进行计算即可。需要注意的是节点间热阻往往是多重热阻叠加,可能既包含2种不同材料间的导热,乃至界面间的接触热阻,也可能包含对流热阻。下面对热阻计算中一些复杂参数的计算进行说明。

### 2.2.2 通风孔与冷却空气间对流散热热阻计算

电机内损耗产生的热量主要通过通风孔内冷却风带走,所以通风孔下层机座上的节点与冷却空气间的对流换热热阻计算十分关键。根据文献[11]的研究,通风孔内空气流动的雷诺数为

$$Re=\frac{\rho u d}{\mu}=65244>2300 \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为空气的密度; $u$ 为空气的平均速度; $d$ 为通风孔等效水力直径; $\mu$ 为空气的运动粘度。

因此通风孔内为湍流状态,则换热努特数为<sup>[12]</sup>

$$Nu=0.166(Re^{2/3}-125)(Pr^{1/3})(1+(d/b)^{2/3})(\lambda/u)^{0.14} \quad (5)$$

式中: $b$ 为通风孔宽度; $\lambda$ 为空气的导热系数。

再根据式(3)即可得到通风孔下层节点与冷却空气间的对流散热热阻。

### 2.2.3 绕组绝缘导热热阻计算

绕组扁铜线上产生的热量从绕组传出时,需要经过铜线、浸漆残余空气、铜线表面漆包层、浸渍漆、绝缘层等,热量传导过程非常复杂。目前主要有3种槽内绕组热模型:多层绕组模型、复合热传导系数模型和T型等效热路模型<sup>[11]</sup>。多层绕组模型能较好地反映绝缘主要材料的热传导过程。根据文献[13-14]的研究,通过等效导热系数的经验公式来估算槽内绝缘的热阻,其表达式如下:

$$R_{ins}=\left\{\delta_i/\lambda_i+\frac{1}{4}\left[\frac{b(1-\sqrt{s_f})}{\lambda_L}K_L+\frac{b(1-\sqrt{s_f})}{\lambda_{air}}(1-K_L)+\frac{d_c-d_w}{\lambda_d}\frac{b\sqrt{s_f}}{d_c}\right]\right\}/S_{ibt} \quad (6)$$

式中: $\delta_i$ 为槽绝缘厚度; $\lambda_i$ 为槽绝缘的导热系数; $b$ 为槽宽; $\lambda_L$ 为浸渍漆的导热系数; $K_L$ 为漆填充系数; $s_f$ 为槽满率; $\lambda_{air}$ 为浸漆后残余空气的导热系数; $\lambda_d$ 为铜线表面包裹绝缘的导热系数; $d_c$ 、 $d_w$ 分别为漆包线和裸铜线的外径; $S_{ibt}$ 为槽部的导热面积。

根据文献[15]中参数,并结合实际工艺进行微调,从而计算得到绕组绝缘导热的热阻。

### 2.2.4 定子铁心齿部与气隙间对流散热热阻计算

气隙间的热传递过程包括传导、对流和辐射,其中辐射所占比较小,一般不予考虑。对于大部分永磁同步电机,气隙间不存在轴向气流。在电机低速运转时,气隙内气流处于层流状态,热量传递主要是空气的热传导过程;当电机转速较高时,气隙内气流为湍流状态,对流传热成为主要热传递方式。

根据文献[11]的研究,气流不同状态通过泰勒数  $Ta$  为:

$$Ta=\frac{\omega^2 r_s \delta^3}{v^2 F_g} \quad (7)$$

式中: $\omega$ 为转子角速度; $r_s$ 为气隙平均半径; $\delta$ 为气隙厚度; $v$ 为空气运动粘度; $F_g$ 为比例系数,一般取1。

则气隙间换热  $Nu$  的值为

$$Nu=\begin{cases} 2 & Ta < 1740 \\ 0.409Ta^{0.241}-137Ta^{-0.75} & Ta \geq 1740 \end{cases} \quad (8)$$

由于气隙为同心圆,其特征尺寸为气隙厚度的2倍,继而求得气隙间的对流换热系数:

$$h_{\text{gap}} = \frac{Nu \times \lambda_{\text{air}}}{2\delta} \quad (9)$$

再根据式(3)得到气隙间对流换热热阻。

### 2.2.5 绕组端部与机内空气对流散热热阻计算

电机转子高速转动时, 会带动机内空气流动, 从而强化了绕组端部与机内空气的对流散热。文献中计算绕组与机内空气对流换热系数的经验公式千差万别, 而且并没有考虑转子压圈上装有小叶片对流动的强化作用。本文采用文献[5]中等效包络面的方法进行计算, 并根据经验对此进行系数(2.0)修正。端盖、机座等与内部空腔内空气的对流换热热阻也依此进行计算。

## 3 热网络求解

根据热网络中节点间的热传递关系和发热量, 可以列出每个节点的热平衡方程。将42个线性方程联立, 即可得到求解热网络节点温度的电机热平衡方程组。本文基于MATLAB/SIMULINK仿真平台, 根据上文分析建立了分析样机的热网络模型, 并根据上文中热阻计算方法自编程计算相应节点间热阻值。通过对电机损耗、特征几何参数、材料物性、冷却条件等特征参数的输入, 即可计算得到电机模型中各节点的温度值, 实现了对电机温升分析的快速响应。

用本文所开发的热网络计算程序对全封闭风冷永磁牵引电动机样机额定工况下的内部温度场分布进行分析, 计算结果如表1所示, 表1中节点温升排布与几何模型中节点位置对应, 红色字为节点编号。

表1 样机额定工况下热网络温升计算值 K

部位	节点温升				
风道下方机壳	1 20.9	2 42.5	3 45.2	4 48.2	5 30.1
定子轭部	6 60.2	7 62.7	8 65.8		
定子绕组	9 126.8	10 125.5	11 126.1	12 130.3	13 139.9
定子齿部	14 75.1	15 77.5	16 80.6		
转子上层	17 68.1	18 70.9	19 71.1		
永磁体	20 69.6	21 72.3	22 72.3		
转子下层	23 66.1	24 69.0	25 68.7		
转轴	26 40.4	27 62.9	28 66.3	29 65.2	30 48.5
轴承	32 48.3				33 53.9
机内空气	34 64.9				35 68.7
端盖	36 5.3				37 25.1
风道上方机座	38 20.3	39 40.4	40 43.0	41 45.8	42 29.3

由计算结果可知, 电机各部件传动端温度一般都高于非传动端, 这是由于冷却空气沿轴向温度逐渐升高。绕组两端温升高于直线段, 这是由于直线段与铁心接触, 散热条件好于端部。电机内最高温升出现在定子绕组非传动端端部, 为139.9 K, 该部位包裹绝缘材料。为防止绝缘材料过热损伤, 仅考虑额定工况电机散热状态时, 绕组绝缘耐高温等级至少需C级。永磁体也未超温, 不会出现退磁。

## 4 试验验证

为验证热网络分析方法的正确性, 将样机不同工况下的热网络计算结果与对应温升试验结果对比。工况1为电机额定工况; 工况2较之工况1冷却风量不变, 但功率增大, 各部分损耗有所增加; 工况3较之工况1各部分损耗不变, 但冷却风量减小。样机各部分在不同工况下采用热网络方法的计算结果和稳态温升试验结果的对比如表2所示。

表2 样机不同工况下热网络计算温升计算结果  
同试验值对比 K

电机部位	工况1		工况2		工况3	
	热网络	试验	热网络	试验	热网络	试验
非传动端绕组端部	126.8	125.0	151.6	153.9	131.9	131.6
传动端绕组端部	139.9	144.6	170.8	178.3	144.4	154.7
铁心	70.1	69.6	80.3	82.3	75.8	78.9
机壳近非传动端表面	20.3	23.7	25.4	26.9	23.3	28.3
机壳中间表面	43.0	40.6	48.9	47.0	48.5	43.9
机壳近传动端表面	29.3	38.0	44.2	44.0	43.7	44.3
非传动端端盖	5.3	4.9	6.6	4.0	6.2	5.7
传动端端盖	25.1	24.3	31.2	27.1	26.5	28.8
非传动端轴承	48.3	46.0	58.2	51.7	56.3	51.9
传动端轴承	53.9	50.5	60.1	58.4	61.1	57.6

注: 根据试验测点, 热网络铁心温升取的是该区域定子齿部和轭部温升的平均值。

通过3组工况热网络电机各部位温升计算结果和试验结果对比, 可以看到:

①对于样机大部分部位, 采用等效热网络方法计算的节点温升与试验值都很接近, 表明热网络对于电机温升预测具有较高准确性。

②传动端绕组端部的计算温升比试验值偏小4~10 K, 可能是由于传动端机内空腔比非传动端大, 转子转动引起的强化对流效果比非传动端差, 而采用热网络计算时未能考虑。

③轴承温升计算结果则比试验结果高约2~7 K, 这可能是由于热网络中加载在轴承上的损耗较之实际大。

总体而言, 经调试后热网络模型对于样机温升预测具有较高准确性, 可以满足工程上对电机温升分析的需求。

## 5 结语

本文研究了热网络方法在电机热管理中的应用。对一款全封闭风冷永磁电动机简化结构并构建等效热网络模型, 在MATLAB/SIMULINK平台上编程计算热网络参数, 并结合电机实际结构调校修正相关参数, 实现了对研究样机温升的快速分析响应。通过等效热网络程序计算结果与试验结果对比发现, 采用等效热网络方法对电机局部温度场分析具有较高准确性, 能够满足电机设计和热分析需求。(下转第124页)