

基于热网络法的高压感应电机 温度计算与分析

王志雄¹ 何彪² 常腾飞²

(1. 机械工业技术发展基金会 2. 国家电网陕西超高压公司)

摘要：为实现对高压高效感应电机稳态温升的快速求解，建立高压电机风道结构的精确设计与优化方法，本文以一台高压高效感应电机为例，基于热网络法的基本原理和对电机结构的合理等效，提出了高压感应电机的热网络模型，并对各节点热平衡方程组进行求解，计算出电机的稳态温度场分布情况；利用热网络计算模型分析计算径向风道宽度与电机铁心长度比、径向风道数量对电机温升的影响，以及绕组端部风量对电机绕组温度分布的影响，为高压电机风道的设计优化提供了依据。通过对样机进行温升试验测试，以及与仿真结果的对比，验证了本文提出的电机热网络模型的正确性。

关键词：高压感应电机；热网络法；温升

0 引言

高压感应电机存在庞大复杂的内部通风道结构，是其功率密度低、单位功率造价偏高的最主要原因^[1-2]。而提升功率密度，势必造成电机风道截面积减小、风阻增加，内部温升上升，绝缘层老化、分层、脱皮加速，出现电机绕组放电、短路而烧毁的风险^[3-4]。因此，快速准确计算电机内部温升，是优化高压感应电机风道与散热结构，提升电机功率密度的关键。

目前，国内外对电机热分析的主要方法有热网络法和包含有限元与有限体积的数值法。文献[5]提出一种感应电机热网络模型并进行热分析。文献[6]建立一种风冷电机的稳态热网络模型，并基于电机初始尺寸对电机进行温升预测。文献[7]提出了一种简化的轴向磁

通电机热阻网络。文献[8]利用有限体积法对永磁同步牵引电动机的三维稳态温度场进行仿真分析和研究。文献[9]提出永磁同步电机热路关键参数的测试方法，并采用热路模型对温升进行研究。文献[10]采用热网络法对大型水轮发电机的定子温度分布进行理论分析。

本文基于热网络法的基本原理，研究建立了高压高效感应电机的热网络模型，求解计算了各节点热平衡方程组及稳态温度分布情况，分析计算了径向风道宽度、径向风道数量、定转子铁心轴向尺寸、绕组端部风量等对电机温升的影响规律，试制高压感应样机并进行温升测试试验，试验结果与仿真结果吻合。

1 等效热网络模型

1.1 数学模型与基本原理

由于电机传热问题的复杂性，工程实践中一般把温度场简化为带有集中参数的热路进行计算。将热路中的研究对象细分为具有集总参数的单元节点，使用热阻参数将相邻节点连接形成热网络。热路中的温差对应于电路中的电压降，热流对应于电路中的电流，热阻对应于电路中的电阻。

1) 电机内的传热过程主要包括热传导和对流散热，对应的热阻为传导热阻和对流散热热阻^[10]：

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1)$$

式中， Φ 为传导热量， A 为面积， λ 为导热系数， $\frac{\partial t}{\partial x}$ 是物体温度沿 x 方向的变化率。

2) 对流换热，满足牛顿冷却公式：

$$\Phi = Ah\Delta t \quad (2)$$

式中， Φ 为传递的热量； A 为面积； h 为表面传热系数； Δt 为壁面温度和流体温度差。

3) 传导与对流换热热阻分别表示为：

$$\begin{cases} R_l = \frac{t}{A\lambda} \\ R_h = \frac{1}{Ah} \end{cases} \quad (3)$$

式中， R_l 为传导热阻； R_h 为对流换热热阻； t 为节点单元厚度。

1.2 基本假设

使用等效热网络法对电机的温度场进行计算，在进行网格剖分和求解时，对计算模型进行必要简化，提出以下假设条件：

- 1) 电机的热源和温度沿圆周方向对称分布且冷却条件相同。
- 2) 铜的导热系数不是无穷大，即绕组在轴向上存在温度梯度。
- 3) 电机腔体内各点空气的温度相同，使用一个节点进行计算。
- 4) 忽略定转子导体的集肤效应。

1.3 物理模型

本文以一台高压高效感应电机为例，其主要参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

名称	数据
定子外径/mm	327
定子内径/mm	230
气隙长度/mm	0.5
铁心长度/mm	220
转轴外径/mm	75
极数	6

电机拓扑及通风结构如图 1 所示，电机的冷却方式为空水冷，电机内部风道为封闭腔体，定转子采用轴向径向混合风道散热结构。电机运行时，端部轴流风扇旋转产生的压力驱动风道内空气做循环运动：挡风板对端部空气流体的流动方向进行定向约束，经轴向径向混合风道引流通过定转子各个热源后，由水冷器冷却至恒定温度，重新通过电机内风冷入口进入风道循环。

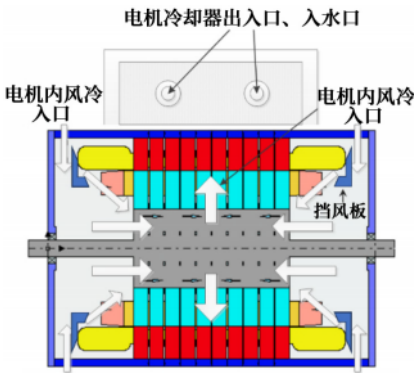


图 1 电机拓扑及通风结构

在电机热网络模型搭建时，由于水冷器内部结构复杂且对电机内部流体分布影响不大，将冷却器等效为恒风量流入。对热梯度变化较大的绕组、绝缘等槽内部件，等效为径向、轴向导热系数不同的热阻元件。

2 基于热网络模型的仿真计算

2.1 电磁仿真

对电机进行电磁性能与电磁损耗的有限元仿真计算，得出额定工况下电机的电磁损耗约 3kW，其中约 2/3 为铜耗。图 2 为电机定、转子的铁耗云图，电机定转子铁耗与铜耗数据见表 2。

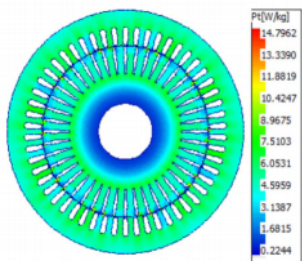


图 2 定转子铁耗云图

2.2 电机温升计算

使用 MotorCAD 软件建立高压感应电机热网络模型，考虑到实际电机中沿轴向排布的各段铁心温差较小，模型中忽略电机各段铁心之间的轴向传热。

如图 3 所示，电机共有三条散热路径：定子绕组和转子导条的热量，以及一部分定子铁心热量，经轴向径向混合风道强迫风冷带出。一部分定子铁心热量，传导散热至机壳外部后，以自然对流的方式带出；一部分转子铁心热量通过气隙传递到定子铁心后，再由定子铁心传导散热。一部分转子铁心热量传导散热至转轴、机壳外表面后，以自然对流的方式进行散热。

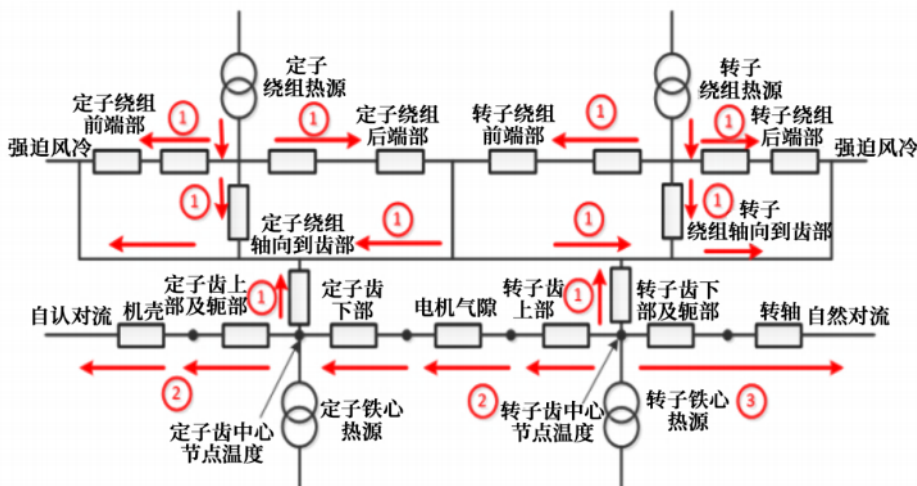


图 3 高压电机热网络简化模型

使用建立的热网络模型，计算电机额定工况下的温升分布，得到电机绕组端部的最高温度为 109.0℃，绕组中部最高温度为 97.9℃，定子铁心最高温度为 87.3℃。对绕组温升的优化是高压电机热设计的主要目标。

3 风道参数对温升的影响分析

3.1 径向风道宽度与铁心长度比的选择

高压电机风道结构参数对电机内部温升具有较大的影响，其中径向风道宽度与铁心长度比是影响电机径向散热的核心参数。如电机铁心长度增加，该参数变小，会造成电机铜耗增加，以热量流入的方式增加了电机的温升；而电机径向风道宽度增加，该参数变大，风阻减小，有利于风量的提升与电机温升的降低。

因此，本文使用热网络模型，在保证电机输出转矩不变，风压不变，效率变化不大的条件下，对电

机径向风道宽度与铁心长度的比值进行优化，以确定最佳的径向风道宽度与铁心长度比，表 2 所示为仿真比较结果。

表 2 径向风道宽度与铁心长度比对电机性能的影响

名称	数据					
径向风道宽度/ 铁心长度	0.01	0.05	0.1	0.15	0.25	0.5
定子铜耗 (W)	1455	1402	1353	1371	1971	2358
转子铜耗 (W)	614	593.5	574.4	583	587	590
铁损 (W)	1106	1091	1076	1059	1161	1266
总损耗 (W)	3175	3086	3003	3013	3719	4214
输出转矩 (N·m)	269	259.7	252.3	252	256.8	258
效率 (%)	89.7	89.6	89.6	89.5	87.6	86.3
绕组最大温度 (℃)	202.1	122.6	118.3	118.5	147.3	164
定子平均温度 (℃)	179	95.2	93.7	94.9	113.1	125.7

由计算结果可以看出，当电机径向风道宽度与铁心长度比增加时，电机转矩略有下降，效率略有下降，电机绕组温度和定子温度先下降后升高。其原因主要为在径向风道宽度与铁心长度比变大时，在 0.01~0.1 范围内对电机铜耗影响不大，但是电机的进风量显著增加，提高了电机的散热能力，电机温度呈现单调下降趋势；而在 0.1~0.5 范围内，电机的损耗增加较多，电机通风量虽仍有所提升，但相对于电机铜耗的增加未能对电机散热起到主导作用，电机温升增加。

综合电机温升、电磁性能，选择径向风道宽度与铁心厚度的最佳比为 0.1 左右。

3.2 径向风道分段数的选择

在确定径向风道宽度与铁心长度比的基础上，进一步选择电机径向风道分段数量。图 4 为电机径向风道数对电机散热系数的影响，图 5 为径向风道数对电机绕组温度和定子铁心温度的影响。可以看出电机的径向风道分段数量在 3~9 之间时，散热系数上升，电机散热能力提升，温度下降；在 9~13 之间时，电机散热系数基本不变，电机温度不变不大；在 13~21 之间时，

电机散热系数上升，电机温度下降。综合电机工艺、成本因素，本文设计电机的径向风道分段数为 9。

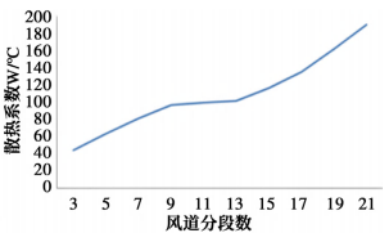


图 4 径向风道数量对电机散热系数的影响

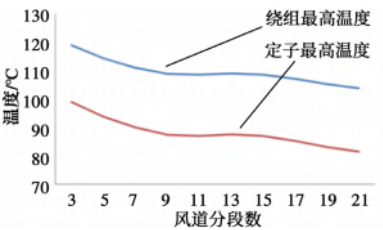


图 5 径向风道数对绕组和定子铁心温度的影响

3.3 端部风量与总风量之比对电机轴向温度分布的影响

由计算知电机的最高温度点出现在绕组端部，为改善电机绕组温度分布不均，在电机绕组处增加挡板调节流入定子绕组端部的冷却风量，从而达到降低绕组最高温度，延长电机绕组电热寿命的目的。

表 3 为电机端部风量与总风量之比对电机绕组温度的影响，当端部风量占比增大时，电机的绕组最高温度不断降低，当所有风量都通过绕组端部时，电机的绕组最高温度为 106.7℃，较初始方案，降低了 2.3℃。图 6 为端部风道优化后的电机轴向截面温度分布。

表 3 端部风量与总风量之比对绕组温度的影响

名称		数据					
端部风量/总风量		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
最高温度 (℃)	绕组端部	109.0	108.0	107.5	107.2	107.0	106.7
	绕组中部	97.9	97.3	97.2	96.9	96.9	96.8
	轴承	49.9	51.2	52.5	53.8	54.0	55.3

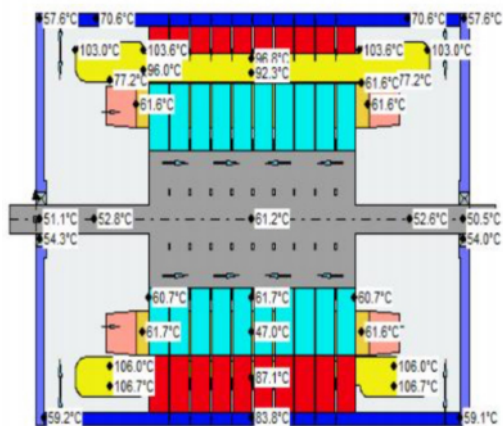


图 6 端部风道优化后的电机轴向截面温度分布

4 试验验证

为验证热网络计算的准确性，按照本文风道设计结果，改造一台高压感应电机的风道结构，并对样机进行温升试验。仿真计算结果与样机试验结果对比情况如表 4 所示。

表 4 仿真计算结果与样机试验结果对比

电机部位	仿真结果	试验结果	误差
绕组外端	106.7°C	103.6°C	3.4%
定子槽部	87.1°C	86.5°C	2.9%
绕组内部	96.8°C	93.6°C	4.4%

对比热网络模型计算结果与样机试验温升结果误差在 4.5% 内，验证了该热网络模型的准确性。

5 结束语

本文研究建立了高压高效感应电机的热网络模型，并进行电机温升计算分析，对电机样机进行温升试验测试，得到了以下结论。

1) 分析计算了径向风道宽度与电机铁心长度比，以及径向风道数量对电机温升的影响，为电机风道的合理设计优化提供了依据。

2) 设计的绕组端部挡风板，可使更多风量通过绕组端部，电机绕组最高温度降低，有利于提高电机

绕组电热寿命。

3) 建立了高压感应电机等效热网络模型，建立了各节点热平衡方程组并进行求解。通过样机温升试验对比，验证了高压感应电机等效热网络模型的准确性。

参考文献

- [1] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 76-96.
- [2] 梁艳萍, 陈晶, 刘金鹏. 磁性楔槽楔对高压感应电动机电磁参数和性能的影响 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14 (3): 1-5.
- [3] 周封, 熊斌, 李伟力, 等. 大型电机定子三维流体场计算及其对温度场分布的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (24): 128-132.
- [4] 鲍晓华, 王瑞男, 倪有源, 等. 汽车发电机定子三维温度场有限元计算 [J]. 微特电机, 2011, 39 (7): 5-8, 28.
- [5] Mellor P H, Roberts D, Turner D R. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design[J]. IEE proceedings.B.Electric power applications, 1991, 138 (5): 205-218.
- [6] Dutta B, Chowdhury S K. Steady state thermal model of TEFC induction machine[C]. IEEE International Conference on Power Electronics. IEEE, 2013.
- [7] Vong P K, Rodger D. Coupled electromagnetic-thermal modeling of electrical machines[J]. IEEE Trans Magn, 2003, 39 (3): 1614-1617.
- [8] 温志伟, 傅德平, 顾国彪, 等. 浸润式混合强迫内冷的蒸发冷却汽轮发电机定子三维温度场的仿真分析 [J]. 电工电能新技术, 2006 (3):

(下转第 56 页)

(上接第 26 页)

- 13-17.
- [9] 汪文博, 陈阳生. 永磁同步电机的热路分析及热阻参数测试 [J]. 机电工程, 2014, 31 (9): 1168-1172.
- [10] 方日杰, 赖烈恩, 蒋俊杰, 等. 用热网络法计算大型水轮发电机定子温度场 [J]. 大电机技术, 1989 (1): 25-29.
- (收稿日期: 2024-08-05)**