

## 专栏 2: 科学和实践发展 现场 电气工程

DOI: 10.17816/transsyst20195216-30

© 李伟力, 曹君慈, 李栋, 李栋  
北京交通大学电气工程学院  
(中国北京)

### 高速动车组异步牵引电机不同通风结

**摘要:** 针对高速动车组异步牵引电机运行时局部温度高, 电机内温度分布不均匀的问题, 本文研究电机不同结构的通风系统对温度分布的影响. 以 600 Kw 异步牵引电动机为例, 建立了牵引电机电磁-流体-温度分析模型, 得到了电机内不同位置的温度值, 并与实测进行对比, 验证了计算结果的准确性. 在此基础上, 通过调整定子和转子轴向通风孔的结构形式, 研究电机内温度分布与流体流动状态的关系; 此外, 还研究流体入射角对流体流速与电机散热性能的影响, 找出电机内轴向及周向温度相对平衡的通风结构方案, 为强迫通风结构型式的电机温升设计提供参考策略.

**关键词:** 高速铁路牵引电机, 通风系统, 流体流动状态.

## Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field “Electrical Engineering”

© Weili Li, Zhigang Wu, Junci Cao, Dong Li  
School of Electrical engineering, Beijing Jiaotong University  
(Beijing, China)

### STUDY ON HEAT EXCHANGE OF DIFFERENT VENTILATION STRUCTURES OF ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR FOR HIGH SPEED EMU

**Background:** Aiming at the problems of high local temperature and uneven temperature distribution in asynchronous traction motor of high-speed Electric Multiple Unit (EMU) when it is running.

**Aim:** In this paper, the influence of ventilation system with different structure on temperature distribution is studied.

**Methods:** Taking 600 kW asynchronous traction motor as an example, the electromagnetic-fluid-temperature analysis model of the traction motor is established, and the temperature values of different positions in the motor are obtained.

The accuracy of the calculation results is verified by comparing with the actual measurement.

On this basis, by adjusting the structure of stator and rotor axial ventilation holes, the relationship between temperature distribution and fluid flow state in motor is studied.

In addition, the influence of fluid incidence angle on fluid velocity and heat dissipation performance of motor is also studied, and the ventilation structure scheme with relative balance of axial and circumferential temperature in motor is found out, which provides a reference strategy for the design of temperature rise of motor with forced ventilation structure.

**Results:** The wind speed near the intake side of stator teeth and rotor teeth groove is less than that far from the intake side. The flow distribution trend of rotor vent is similar to that of stator vent, but the air in the groove is affected by centrifugal force of rotor rotation, which makes the wind speed difference on the intake side larger than that on the outlet side.

The stator winding and rotor guide bar are affected by wind temperature to reach the maximum temperature at the end of the outlet respectively. The stator core is higher at the windward side and the leeward side than the other parts of the motor. The heat dissipation effect at both ends is good.

The highest temperature of the stator core appears near the leeward side.

**Key Words:** Traction Motor, Ventilation System, Fluid Flow State

## 1. 引言

在牵引传动系统中的牵引电机是高速列车和动车组核心组成部分之一，其性能决定了列车动力的品质，与高速铁路运行的安全直接相关。由于高速列车中的电机安放空间有限，电机功率密度大，且其热负荷大，导致电机发热严重，影响电机的使用寿命和列车的运行安全。目前电机控温是牵引电机发展的最大瓶颈，环境温度过高使得进风温度高；进风口有杂物阻挡，使得进风不畅造成进风量小；电机内部灰尘过多，影响散热；风扇毁坏造成无风或风量小；通风结构不够合理使得风路短路等都会造成电机散热不良，温度增加。如果电机长时在允许的最高温度工作，将会加速绝缘老化，最终烧毁电机。所以准确计算电机内部温度，对电机进行通风结构改进具有重要意义。

关于温度-流体的流固耦合计算，已经有很多学者对此进行了研究。Dae G.K. 针对牵引电机密闭式结构致使其散热困难的问题建立了电机的三维耦合模型，对原模型中的冷却介质进行了流量分析，通过改变其通风冷却结构改善其冷却性能 [1]。Mugglestone J.等利用CFD软件，模拟了风冷式感应电机定子端部区域的流场和传热过程，计算结果与结果显示在定子端部绕组侧产生环流，并估计了局部传热系数，结果显示流体的空间变化是正确的 [2]。Mayle E.R.等提出了考虑汽轮发电机定转子间气息旋转状态下的一种分析方式，这种分析同时考虑了冷却气体入射区域流量，角动量和静压的变化，通过简单的计算表明这种旋转气息流动具有的一种平均切向速度与将其取为转子速度的一半不同，并将这两种方式进行了比较，发现前者更符合实际 [3]。Xiaolong Lu等对旋转超声电机的瞬态和稳态温度场进行了有限元分析，并对具有不同尺寸的超声电动机进行了仿真，发现不同型号的电机温度分布具有不同的不均匀性，其达到热稳定性所需的时间也各不相同，但电机最高温度点均位于定子与转子之间的接口处，并通过实验验证了计算方法的准确性 [4]。

本文采用数值算法中的有限体积法，建立电机的三维全域模型，通过流固耦合比较准确的分析了电机内部的空气流动状态和温度分布规律，并依此进行了通风结构的改进。

## 2. 电机模型建立与流体计算分析

### 2.1. 牵引电机流体-温度模型建立

本文研究的600kW高速列车牵引电机采用轴向通风冷却结构，其基本额定参数如

表 1 所示。

表 1. 高速列车牵引电机基本参数

电机参数	数值
额定功率/kW	600
额定电压/V	2730
额定电流/A	155
频率/Hz	155.55
效率	94 %
定子铁心长度/mm	270
定子外径/mm	555

本文电机采用开路冷却的轴向通风方式，分为三路进行通风，一路进入定子通风沟，一路进入定转子间气隙，一路进入转子通风沟。图 1 为电机通风结构示意图，箭头所指方向为电机内流体流动方向。

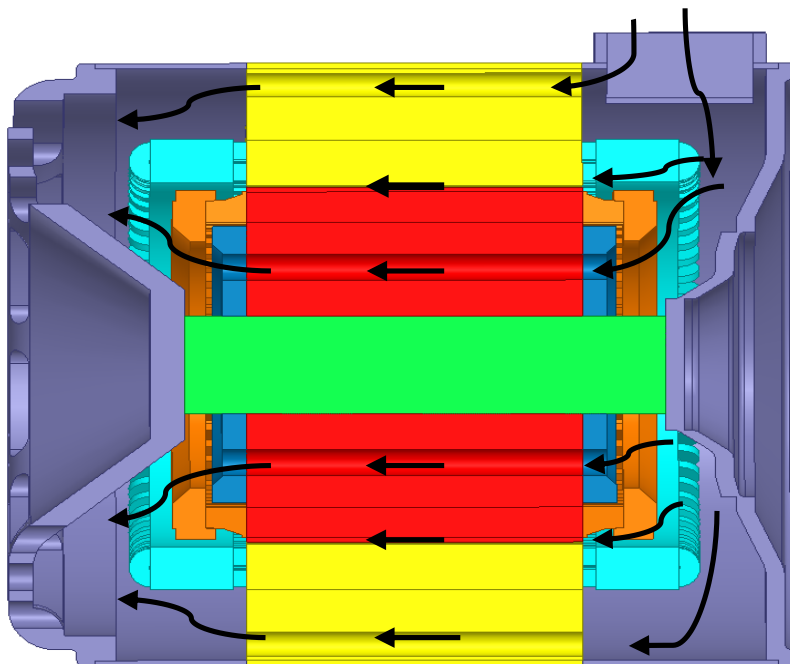


图 1. 高速列车牵引电机通风结构

在此基础上, 为合理求解电机流固耦合模型, 做出基本假设如下所示.

(1) 电机内空气流体雷诺系数较大, 大于 2300, 故电机内部有湍流存在, 流体流动形态属于湍流.

(2) 由于标准大气压下, 流体浮力和重力对电机内流体流动的影响很小, 故对其忽略不计.

(3) 气体的可压缩性与环境温度和外界压力有关, 其密度变化可否忽略取决于气体流动的 Mach 数. 由于电机内流体流动速度小于声速, 故将流体作为不可压缩流体处理 [5].

(4) 绕组绝缘浸漆均匀.

(5) 认定槽楔与槽绝缘同宽, 具有相同绝缘属性.

(6) 本文研究的是电机稳态时流体的定常流动状态, 故求解方程不含时间变量 [6].

(7) 假定热源密度在电机各个部件中均匀分布 [7].

得到电机结构图如图 2. 所示.

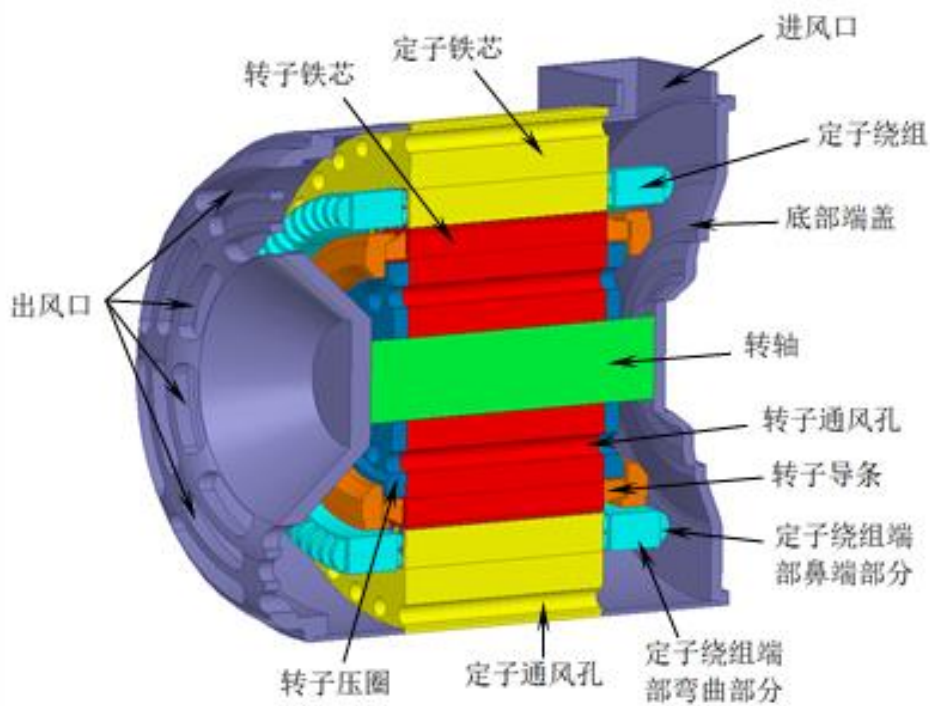


图 2. 求解域内部结构图

通过电磁场计算分析与实际测量结果, 得到电机内各部份的损耗如表 2. 所示.

表 2. 负载时电机损耗分布表

	损耗 (kW)
定子绕组	5.814
定子齿部	2.667
定子轭部	5.825
转子导条	3.900
附加损耗	3.159

根据所建求解域特点,列出如下边界条件:

- (1) 入口边界条件为速度入口,入口速度为 25.5 m/s.
- (2) 与空气接触的固体表面均设为无滑移边界条件.
- (3) 转子内部空气为旋转流场,定子部分空气作为静止状态模拟.
- (4) 出口边界条件为压力出口,初始压力为一个大气压.
- (5) 根据给出的损耗分别给定子绕组,定子轭部,定子齿部,转子铁心,转子导条这些热源赋值 [8].

## 2.2. 牵引电机流体-温度场计算结果分析与实验验证

图 3(a). 表示靠近进风口一侧的整体流体流动状态,图 3(b). 表示远离进风口一侧的整体流体流动状态,现截取并放大进风口部分的流体矢量图并分别分析进出风口机腔以上两个部分的流体流向.

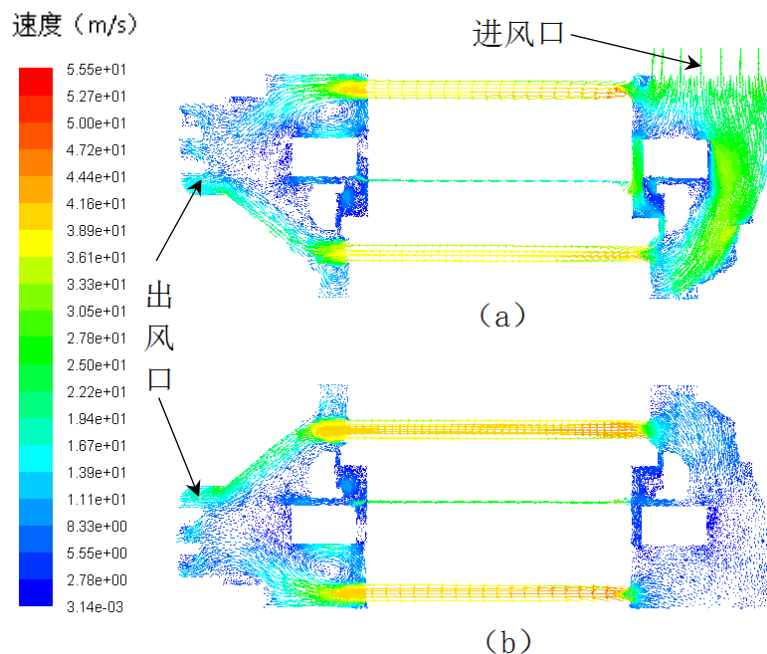


图 3. 电机径向截面流体流速矢量图

定子通风孔流体迹线如图 4. 所示,可以看出定子通风孔出风口处流体在定子绕组端部弯曲部位形成的涡流周向分布均匀.

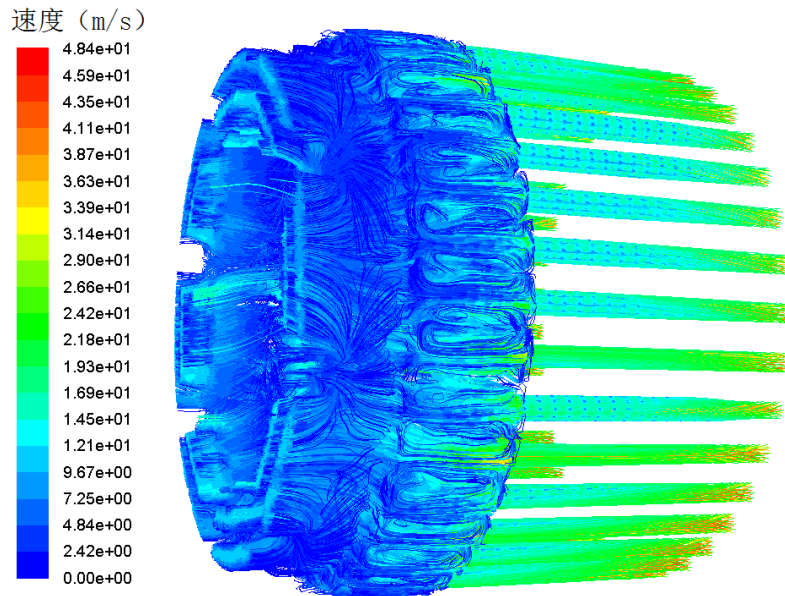


图 4. 定子通风孔流体迹线图

根据电机流体的计算, 得到电机温度分布. 图 5. 表示了整个电机的三维温度分布云图, 据图所示结果可知, 定子铁芯表面最高温度大约是在  $117\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 出现在轴中心靠近出风口一侧, 分别向两端机壳传热. 随着轴向位置向出风口处推移, 温度越靠近铁芯部分越高, 由于流体在铁芯段与电机内部热源进行了对流换热, 使得在出风口处整体风温高于进风口风温, 造成进风口机壳温度比出风口机壳整体温度低  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右. 电机内部最高温度为  $217\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 出现在转子位于出风口机腔内的端环上.

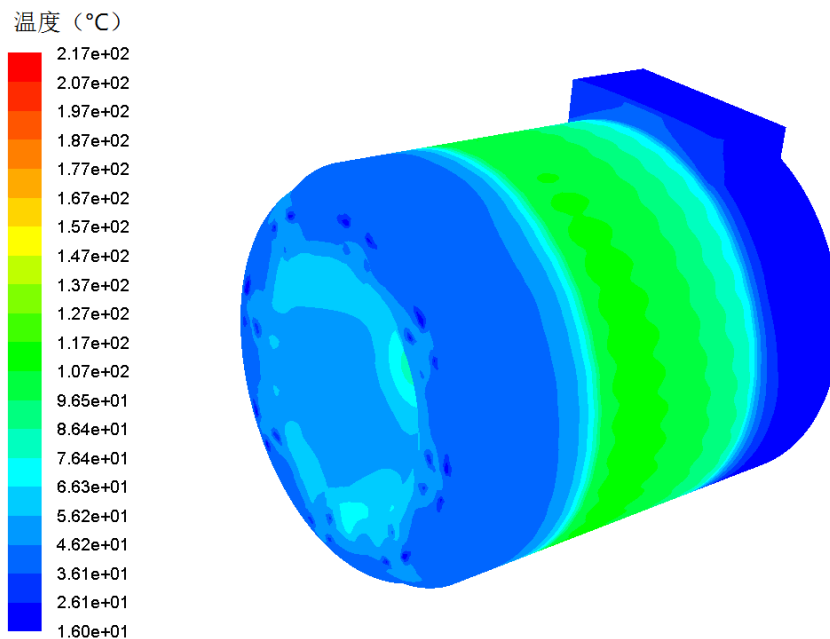


图 5. 电机整体温度分布云图

为了更好地研究电机内部温度, 截取了电机轴中心面的温度进行分析 [9], 如

图 6. 所示. 电机整体温度分布沿轴向较为均匀, 定子绕组温度分布呈现出靠近进风口一侧的温度低于远离进风口一侧的温度趋势, 转子导条温度为整个截面最高, 其温度值为  $159\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 定子部分热量传递过程为定子绕组传递给槽绝缘, 再传递给定子齿, 定子轭, 转子部分热量传递过程为转子导条传递给转子铁芯, 再传递给转轴.

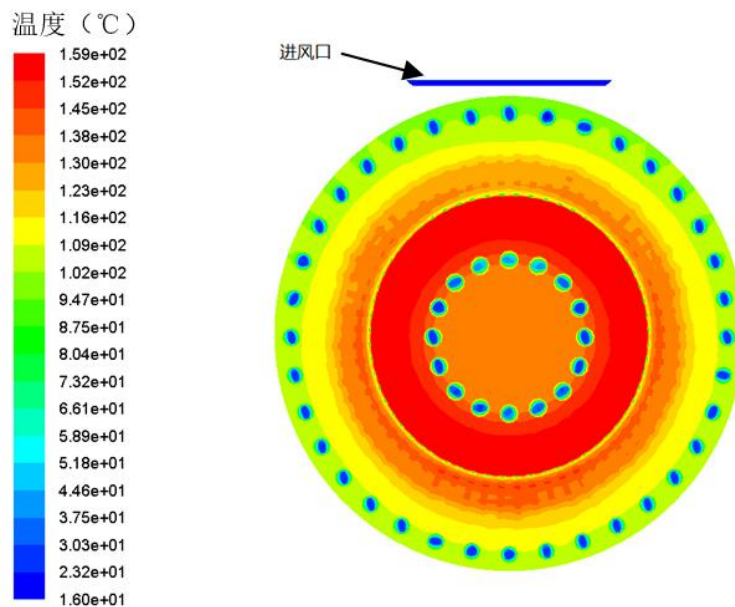


图 6. 电机轴中心截面温度分布云图

在电机稳定运行额定状态下, 通过埋设温度传感器, 采集了电机轴中心正对进风口靠近定子齿根的轭部处温度, 其温度值为  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而其对应位置的计算值为  $111.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

与此同时, 还在进风口内部进行了静动压实验, 测量结果显示静压的实测值为  $1906\text{ Pa}$ , 相应位置的计算值为  $1810\text{ Pa}$ ; 动压的实测值为  $727\text{ Pa}$ , 相应位置的计算值为  $697\text{ Pa}$ .

通过比较温度, 静压和动压的计算值与实验测量值可知, 温度计算值与实验值误差为  $1.7\%$ , 静压相对误差为  $5.0\%$ , 动压相对误差为  $4.1\%$ , 满足精度要求. 通过实验测量验证了所建模型与实际情况相符以及所用计算方法准确性.

### 3. 不同通风结构的电机流体场及温度场

虽然最高温度出现在转子端环处, 但转子耐高温能力强, 而定子绝缘温升是有限制的, 本文以降低定子绕组温升为目标进行了通风结构的改

进研究了定子通风孔位置对电机流体及温度场的影响，在其基础上选择最佳方案，之后研究了进风口流体入射角度变化对电机内部温度场流体场的影响。

### 3.1. 定子通风孔径向位置的不同对电机流体和温度的影响

针对原模型的流体和温度分布特点，在不改变电机其他结构的基础上，调节定子通风孔所在的径向位置，分别提出了三种方案，如图 7. 所示. 原始模型定子通风沟所在位置为铁芯径向位置 0.2575 m 处，三个方案分别将通风孔设置在铁芯径向位置 0.247 m, 0.237 m 和 0.227 m 处.

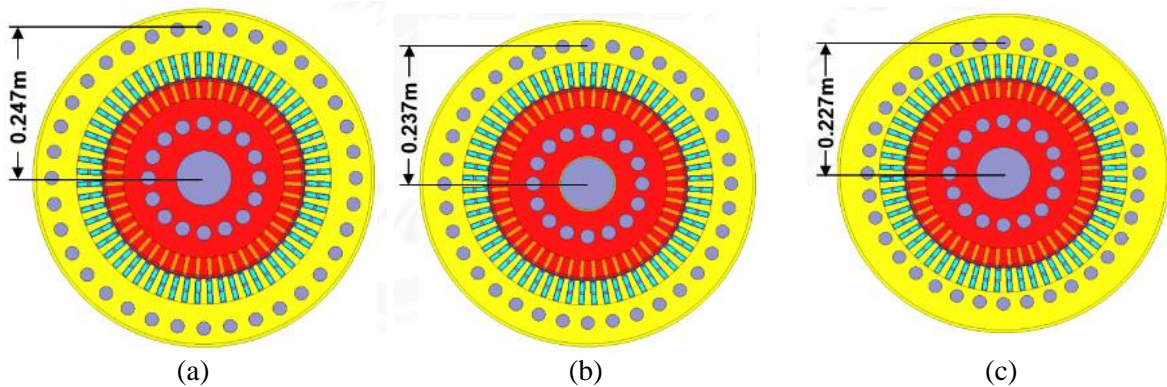
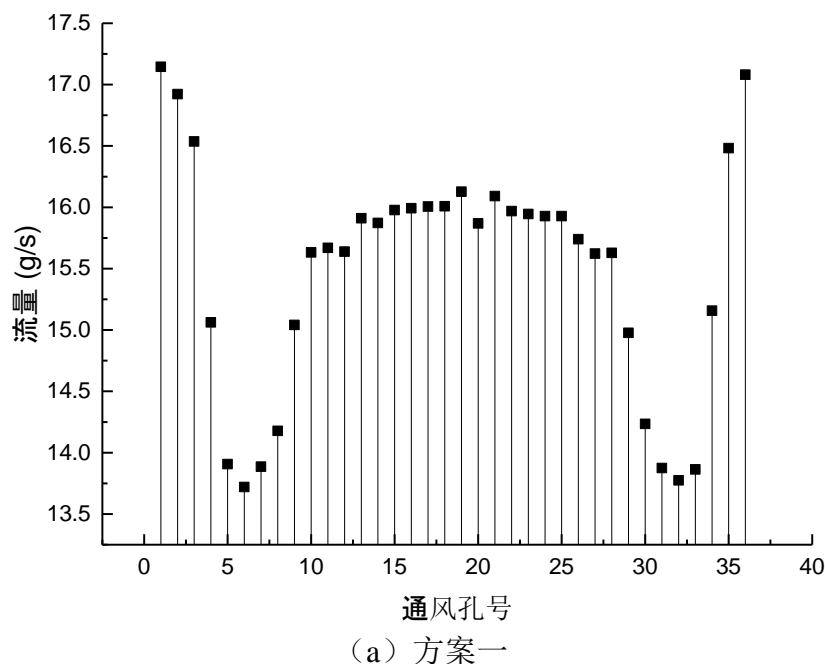
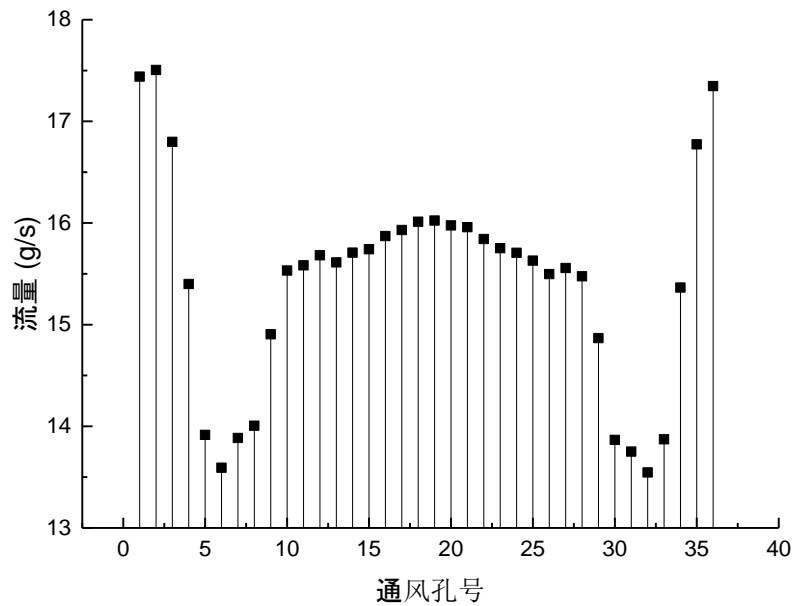


图 7. 三个方案通风孔位置示意图

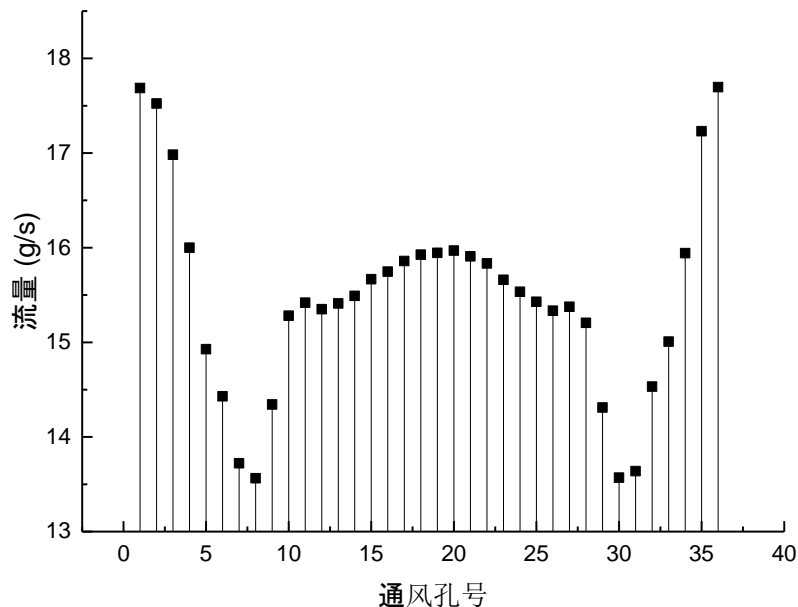
根据通风孔号的顺序，命名定子通风孔，并分别截取每个通风孔入口流量进行对比分析。图 8. 表示了三个方案各个通风孔的流量分配。







(b) 方案二



(c) 方案三

图 8. 定子通风孔周向入口流量分配

三种方案的风量分配趋势大体相同，与原始模型不同的是三种方案的流量分配都是正对进风口且靠近其一侧的流量大于远离一侧的流量。改变通风孔位置对远离进风口一侧的通风孔流量并没有什么影响，反而增加了靠近进风口侧的流量。

根据原始模型的定子绕组温度分布，截取具有最高温度值的定子绕组进行分析 [10]。观察图 10。可以看出，三个方案温升趋势相同，最高点位置相同，均出现在轴向长度 0.017 m 处。方案一沿轴向最高温度为 146 °C，方案二最高温度为 143 °C，方案三最高温度为 135 °C，而原始模型沿轴向最高温度为 147 °C。由此可知，方案三对定子绕组通风散热效果相对最优，最高温度点的温度比原始模型少 12 °C。

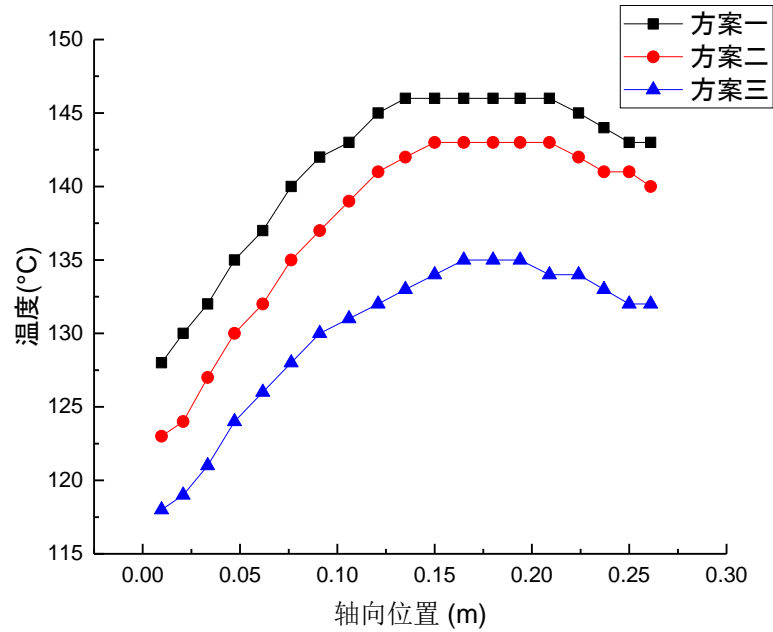
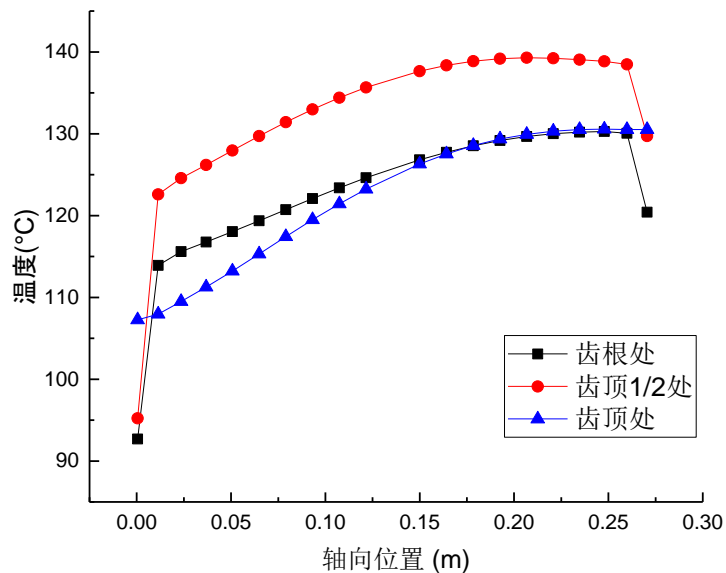
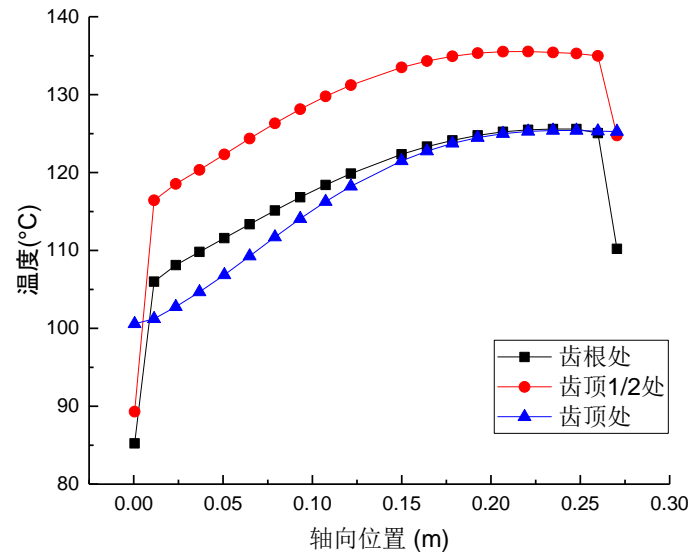


图 9. 定子绕组沿轴向温度分布曲线

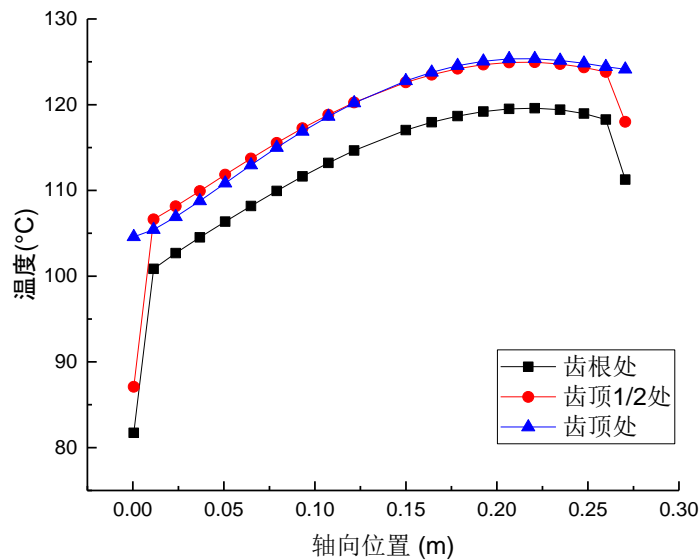
现选取正对进风口且远离其一侧的定子齿进行分析, 齿部沿轴向的温度变化见 图 4-7.



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

图 10. 定子齿沿轴向温度变化图

由图可知，三种方案的齿部温度变化趋势与原始模型相同，原模型齿顶最高温度为  $176.73\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，齿顶1/2处最高温度为  $182.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，齿根最高温度为  $179.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。方案一齿顶最高温度为  $130.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，齿顶1/2处最高温度为  $139.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，齿根最高温度为  $130.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。方案二齿顶最高温度为  $125.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，齿顶  $\frac{1}{2}$  处最高温度为  $135.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，齿根最高温度为  $125.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。方案三齿顶最高温度为  $125.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，齿顶  $\frac{1}{2}$  处最高温度为  $124.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，齿根最高温度为  $119.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.2. 流体入射角度不同对电机流体和温度的影响

在上文基础上研究进风口倾斜角度和倾斜方向对电机流体和温度场的影响，并提出了一下方案 11.

表 3. 改变进风口倾斜方向倾斜角度的方案

方案	一	二	三	四
倾斜方向	倾向定子	倾向定子	倾向端盖	倾向端盖
倾斜角度	5°	10°	5°	10°

定子通风孔的命名方式与基础模型一致，根据通风孔号的顺序，分别截取每个通风孔入口流量进行对比分析，如图 11. 所示。

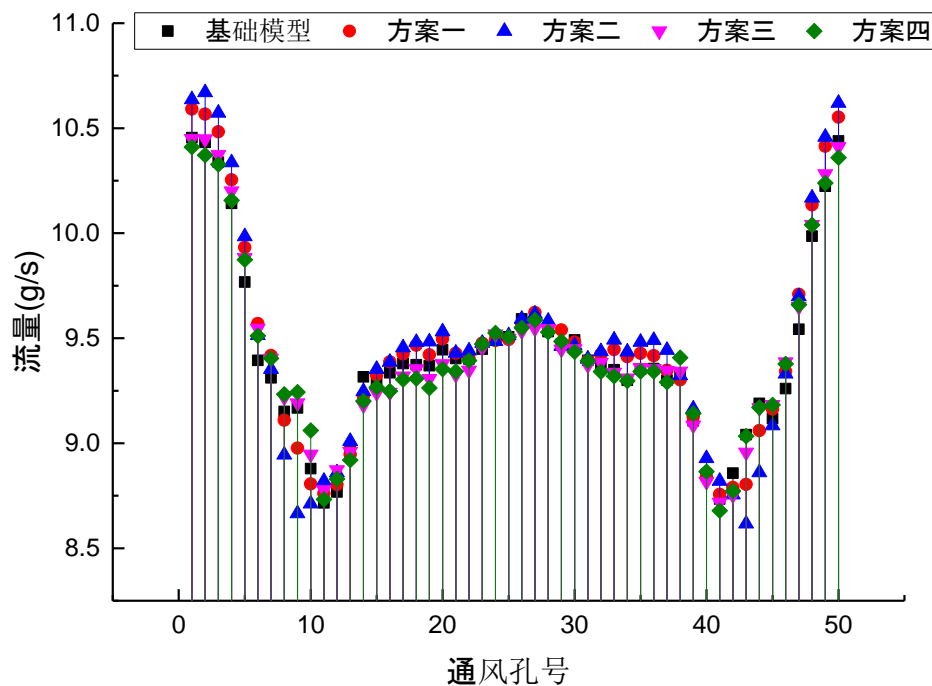


图 11. 定子通风孔入口流量对比图

由图 11. 可以看出改变进风口倾斜方向和角度对定子通风孔流量分布的影响不大，方案二正对进风口方向且靠近进风口一侧的通风孔流量要比基础模型多一些，1号通风孔比原始模型多 0.14 g/s，但是 8号, 9号, 10号, 42号, 43号 要比其他方案低，26号通风孔与其他方案流量相同，26号通风孔附近流量有所增加。

### 3.3. 电机整体温度场温度对比研究

经过流体固体耦合计算，得到各个方案下的电机内部温度分布。

表 2. 的电机内部温度分布.

°C	绕组	定子轭	定子齿	槽绝缘
原模型	146.67	137.68	145.57	148.35
方案一	128.07	119.42	126.7	129.38
方案二	127.59	119.21	126.42	129.09
方案三	125.52	118.34	125.24	127.7
方案四	129.38	120.27	127.38	130.15

对比以上方案的定子绕组可以看出方案三的定子绕组温度值在所有方案中为最低, 比基础模型低 4.73 °C, 比原始模型低 21.15 °C. 四个方案在定子轭部和齿部温度相差不多, 方案三轭部温度值比基础模型低 2.02 °C, 齿部温度值比基础模型低 2.93 °C. 观察槽绝缘温度值可知, 方案一和方案二温度值很接近, 方案四和基础模型温度值差别很小, 方案三温度最低, 比基础模型温度值低 3.27 °C, 比原始模型低 20.65 °C. 转子铁芯部分各个方案温度相差不多, 其中方案四温度最低, 方案三温度最高, 且其温度值与基础模型接近. 故从降低定子绕组温升的角度出发, 方案三为较优选择.

#### 4. 结论

本文的研究工作和成果如下:

- 1) 定子齿间和转子齿间凹槽靠近入风口一侧的风速小于远离进风口一侧的风速, 转子通风孔流量分布趋势与定子通风孔类似, 但凹槽内空气受转子旋转的离心力作用, 使得进风口一侧的风速差大于出风口一侧的风速差.
- 2) 定子绕组和转子导条受风温的影响分别在出风口端部达到最高温, 而定子铁芯在迎风面和背风面处与空气接触面较电机其他部位高, 两端散热效果好, 定子铁芯最高温度出现在靠近背风面处.

作者明确表示:

1. 没有采取或发生利益冲突;
2. 本文不包含任何以人为研究对象的研究.

**The authors make it expressly clear that:**

1. No conflict of interests has taken or make take place;
2. The present article does not contain any researches with people involved as the objects of researches.

#### 参考 / References

1. Kim DG, Kim SC. A Study on the Enhancement of the Cooling Structure for In-wheel Motor Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers. *The Korean Society of Automotive Engineers*. 2013;21(1):36-42. doi: 10.7467/ksae.2013.21.1.036
2. Mugglestone J, Pickering S J, Lampard D. Prediction of the heat transfer from the end winding of a TEFC strip-wound induction motor [C]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings (Cat. No.99EX272)

- 1999:671-681. doi: 10.1109/iemdc.1999.769153
3. Mayle RE, Hess S, Hirsch C, et al. Rotor-stator gap flow analysis and experiments [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1998;13(2):101-110. doi: 10.1109/60.678972
  4. Lu X, Hu J, Zhao C. Analyses of the temperature field of traveling-wave rotary ultrasonic motors.[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*. 2011;58(12):2708-19. doi: 10.1109/tuffc.2011.2133
  5. Valenzuela MA, Reyes P. Simple and reliable model for the thermal protection of variable speed self-ventilated induction motor drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010;46(2):770-778. doi: 10.1109/tia.2009.2039842
  6. Mroz J. Temperature field of a double squirrel-cage motor during startup [J]. *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*. 2005;152(6):1531-1538. doi: 10.1049/ip-epa:20045219
  7. Cummings PG. Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1986;IA-22(6):1121-1126. doi: 10.1109/tia.1986.4504843
  8. Bennion K, Cousineau J. Sensitivity analysis of traction drive motor cooling [C]. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. 2012:1-6. doi: 10.1109/itec.2012.6243512
  9. Mendes AMS, Lopez-Fernandez XM, Cardoso JM. Thermal evaluation of TEFC three-phase induction motors under different supply frequencies [C]. 18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines. 2008:1-6. doi: 10.1109/icelmach.2008.4800075
  10. Hruska K, Kindl V, Pechanek R, et al. Evaluation of different approaches of mathematical modelling of thermal phenomena applied to induction motors [C]. 2014 ELEKTRO IEEE. 2014:358-362. doi: 10.1109/elektro.2014.6848918
  11. Nair DG, Jokinen T, Arkkio A. Coupled analytical and 3D numerical thermal analysis of a TEFC induction motor [C]. 18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2015. doi: 10.1109/icems.2015.7385008

#### 有关作者的信息:

李伟力, 工学博士, 教授;

ORCID: 0000-0003-4316-9642; Scopus Author ID: 8683345900;

E-mail: wlli@bjtu.edu.cn

曹君慈, 工学博士, 副教授;

ORCID: 0000-0003-1373-839X; Scopus Author ID: 35214365100;

E-mail: jccao@bjtu.edu.cn

李栋, 工学博士, 讲师;

ORCID: 0000-0002-2359-9648; Scopus Author ID: 56610865300;

E-mail: donglz223624@126.com

吴志刚, 博士研究生;

ORCID: 0000-0003-1373-839X; Scopus Author ID: 57197774861;

E-mail: sdwuzhigang@163.com

**Information about the authors:**

**Weili Li**, Doctor of Engineering Sciences, Professor;  
ORCID: 0000-0003-4316-9642; Scopus Author ID: 8683345900;  
E-mail: wlli@bjtu.edu.cn

**Junci Cao**, Doctor in Engineering, Associate professor;  
ORCID: 0000-0003-1373-839X; Scopus Author ID: 35214365100;  
E-mail: jccao@bjtu.edu.cn

**Dong Li**, Doctor in Engineering, Lecturer;  
ORCID: 0000-0002-2359-9648; Scopus Author ID: 56610865300;  
E-mail: donglz223624@126.com

**Zhigang Wu**, doctoral candidates;  
ORCID: 0000-0003-1373-839X; Scopus Author ID: 57197774861;  
E-mail: sdwuzhigang@163.com

**引用这篇文章:**

李伟力, 曹君慈, 李栋, 李栋. 高速动车组异步牵引电机不同通风结构. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):16-30. doi: 10.17816/transsyst20195216-30

**To cite this article:**

Li W, Wu Z, Cao J, Li D. Study on Heat Exchange of Different Ventilation Structures of Asynchronous Traction Motor for High Speed EMU. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):16-30. doi: 10.17816/transsyst20195216-30