

文章编号: 1671-6612 (2024) 03-293-06

# 真空管道内直线电机 定子温度分布与散热特性研究

陈文庆 毕海权 周远龙

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 为研究真空管道内直线电机定子的温度分布和散热特性,建立了直线电机定子温度分布三维数值计算模型,利用 Fluent 软件模拟了定子 in 通电及散热阶段的温度场变化,研究了不同管道压力 (0.005、0.01、0.02、0.05、0.1atm) 对线圈表面自然对流换热性能的影响,分析了自然对流换热与辐射换热的相对强弱。研究表明,列车单次运行引起的定子温升很小,线圈最高温升为 14.6°C,经两小时散热后温升仅为 0.55°C;通电线圈产生的热量 95%以上通过导热传递给铁芯和支架,而通过对流和辐射所传递的热量非常少,管道内压力对线圈表面的自然对流换热量有很大影响;线圈表面的辐射换热量大于自然对流换热量。研究结果为真空管道直线电机定子的温升特性及散热方法研究提供了理论依据。

**【关键词】** 真空管道; 直线电机; 温度场; 散热特性

中图分类号 U237/TM37 文献标志码 A

## Study on Temperature Distribution and Heat Dissipation Characteristics of Stator of the Linear Motor in Vacuum Tube

Chen Wenqing Bi Haiquan Zhou Yuanlong

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** In order to study the temperature distribution and heat dissipation characteristics of stator of the linear motor in vacuum tube, this paper established a three-dimensional numerical calculation model of stator temperature distribution of linear motor, and simulated the temperature field changes of stator in the energizing and heat dissipation stages by Fluent software. The influence of different tube pressures (0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1 atm) on the natural convection heat transfer performance of coil surface was studied, and the relative strength of natural convection heat transfer and radiation heat transfer was analyzed. The results show that the temperature rise of the stator caused by a single train operation is small, the maximum temperature of the coil is 14.6 °C, and the temperature rise is only 0.55 °C after two hours of heat dissipation. More than 95% of the heat generated by the energized coil is transmitted to the iron core and bracket through heat conduction, while the heat transferred by convection and radiation is very small, and the pressure of the tube has a great effect on the natural convection heat exchange on the coil surface. The radiation heat transfer on the coil surface is greater than the natural convection heat transfer. The research results provide a theoretical basis for the research of temperature rise characteristics and heat dissipation methods of stator of the linear motor in vacuum tube.

**【Keywords】** Vacuum tube; Linear motor; Temperature field; Heat dissipation characteristic

作者简介: 陈文庆 (1999.03-), 男, 在读研究生, E-mail: 1443736984@qq.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2023-12-25

## 0 引言

随着社会发展和科技进步,人们对于交通工具的速度要求越来越高。真空管道磁悬浮高速列车结合了真空环境与磁悬浮技术,可以大大降低列车高速运行所产生的阻力,提高列车运行速度,与传统轨道列车相比,由于其真空环境,列车运行所产生的噪声大幅降低,车内乘客会有更好的体验。作为一种新型的轨道交通方式,真空管道磁悬浮列车具有安全、高效、便捷的优势,目前已逐渐成为交通领域研究的热点<sup>[1]</sup>。然而随之也带来了一系列相关的问题,在真空环境下,管道内空气密度减小,直线电机定子线圈所产生的热量难以散发出去,会随着列车不断运行而聚集,造成电机温度升高,影响列车的安全运行。

真空管道内直线电机以车载永磁体为动子,轨道上交流绕组为定子,在多次、短时和大驱动电流的情况下,线圈绕组会产生大量的热,有必要对其温度场进行研究,分析其热量的散失途径以及随管道压力的变化。近年来,许多学者对通电时线圈绕组的温度场进行了研究。为简化计算,部分学者通过经验公式计算电机的对流换热系数,使用有限元的方法进行模拟研究。如佟生来等<sup>[2]</sup>利用平板强迫对流换热公式计算电磁铁表面的对流换热系数,分析了列车在静浮、匀速及真实运营时的电磁铁温升特性,并提出了散热方案。章九鼎<sup>[3]</sup>使用有限元的方法分析了中速磁悬浮长定子直线同步电机励磁电磁铁的损耗和热效应,指出走行风是电机散热的主要途径。王晓远等<sup>[7]</sup>则基于旋转体表面对流换热准则关系式,通过等效热网络法对电机温度场进行了研究证明等效热网络法的适用性。然而,使用经验公式计算的换热系数与实际运行时电机表面的换热系数存在较大差异,因此部分学者通过流体仿真进行分析,如魏龙涛等<sup>[8]</sup>通过计算流体力学的方法研究了真空管道中悬浮电磁铁温度随管道真空度及环境温度的变化规律,指出真空度及环境温度对电磁铁散热性能有很大影响。张俊博等<sup>[9]</sup>研究了列车运行速度及真空度对电磁铁的温度影响,发现在电磁铁中存在超温的现象。殷乃睿等<sup>[10]</sup>对电磁铁进行流体仿真,比较了边界为等温壁面与压力出口对仿真的影响。

上述针对电机温升特性的研究多围绕悬浮电磁铁而展开,其固定在列车上,可跟随列车运动,

运行期间通电时间长且受活塞风的影响大,而真空管道内直线电机定子线圈固定在轨道上,不跟随列车运动,风速的影响较小。虽然其通电时间短暂,但是通电电流大,且管道内对流换热能力弱,目前鲜有对其温度场进行研究。

本文基于真空管道列车直线电机实验线路,建立直线电机定子三维模型,使用 Fluent 软件研究定子温度场和散热特性随时间及管道压力的变化规律,分析定子散热的主要途径。

## 1 直线电机定子传热分析

直线电机定子热量的来源包括线圈绕组产生的铜损和铁芯所产生的磁滞损耗,相比于铜损,铁损可以忽略不计,故直线电机定子铁芯的主要热量来源于线圈绕组。在 Fluent 中,可将线圈视为体热源,发热功率通过如下公式进行计算:

$$Q = \frac{I^2 R}{V} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为线圈单位体积发热功率;  $I$  为线圈电流;  $R$  为线圈电阻;  $V$  为线圈体积。经过计算,直线电机定子绕组的体热源为  $1.2765 \times 10^7 \text{W/m}^3$ 。

直线电机定子的温度场不仅与热源有关,还与加热时间,散热方式等相关。图 1 所示为定子传热示意图,线圈绕组的散热方式主要有以下三种:

(1) 与铁芯、支架的导热。线圈绕组缠绕在铁芯上,会通过热传导的方式将热量直接传递给铁芯,进而传递给支架。

(2) 与管道内空气的对流换热。线圈绕组温度升高将带动周围空气温度升高,与附近空气形成密度差而驱动空气流动,从而将热量传递给空气。

(3) 与支架、管道壁面间的辐射换热。线圈通电后其温度高于管道壁面,会通过辐射的方式向外传递热量。

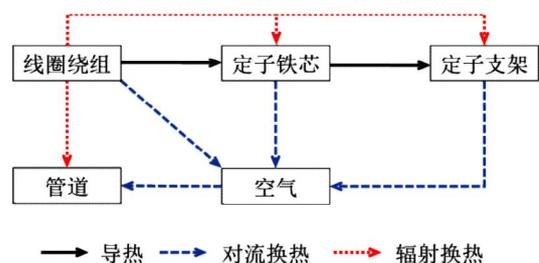


图 1 定子传热示意图

Fig.1 Schematic diagram of stator heat transfer

## 2 数值模拟方法

### 2.1 控制方程

在直线电机定子温度场模拟中, 线圈绕组以及铁芯表面的对流换热系数通过求解外流场获得, 对于管道内的理想气体三维可压缩流动, 其流动控制方程为:

理想气体状态方程:

$$p = \rho R_g T \quad (2)$$

连续性方程<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \quad (3)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho u V) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}u) + F_x \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho v V) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad}v) + F_y \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \text{div}(\rho w V) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad}w) + F_z \end{aligned} \quad (4)$$

能量守恒方程既可以表示体力流动的热量传递, 也可以表示固体的能量传递过程其通用形式可用下式表示<sup>[12]</sup>,

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho V T) = \text{div}\left(\frac{h}{C_p} \text{grad}T\right) + \phi \quad (5)$$

式中:  $p$  为管道内压力;  $R_g$  为气体常数;  $T$  为空气温度;  $\rho$  为空气密度;  $v$  为速度矢量;  $t$  为时间;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的分速度;  $\mu$  为动力粘度;  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  为不同方向的体积力;  $h$  为导热系数;  $\phi$  为源项;  $C_p$  为定压比热。

### 2.2 数值模型

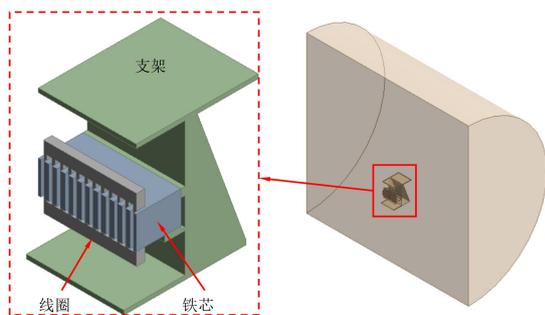


图 2 真空管道直线电机定子计算模型图

Fig.2 Numerical model diagram of vacuum tube linear motor electromagnet

建立如图 2 所示的直线电机定子模型, 管道长 3m, 直径 3m, 内部左右两侧有对称定子与支架,

为减少计算量采用对称模型, 并选取一个周期长度的定子进行建模计算。其中, 铁芯高 80mm, 宽 110mm, 节距 240mm, 槽形采用开口槽, 槽宽 8mm, 槽深 27mm, 定子绕组为 12 相, 绕组为单层独立绕组, 采用成型线圈嵌放在槽中。

本文重点关注定子温度场的变化及管道压力对散热的影响, 在不影响计算的前提下对模型做如下简化:

(1) 由于线圈绕组单匝尺寸很小, 故将全部线圈作等效处理, 在建模时忽略匝间绝缘层与缝隙, 将绝缘层、漆膜、槽楔以及空气等效为槽绝缘<sup>[13]</sup>, 在 Fluent 中使用壳模型进行处理。

(2) 不考虑定子铁芯的铁损、机械损耗。

(3) 管道内列车风很快衰减为 0, 故在计算中定子线圈绕组与管道内空气的换热过程为自然对流换热。

(4) 直线电机定子长度很长且是周期性排列的, 不考虑边端效应。

(5) 忽略铁芯硅钢片之间的缝隙, 将其视为一个整体。

直线电机定子的材料特性参数如表 1 所示。铁芯导热系数表现为各向异性, 垂直于硅钢片的导热系数为  $0.57\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 其余方向为  $42.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

表 1 材料特性参数

Table 1 Material properties parameters				
部件	所用材料	导热系数 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	比热容 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	密度 $\text{kg}/\text{m}^3$
线圈绕组	铜	387.6	381	8978
铁芯	硅钢片	$0.57 \times 42.5 \times 42.5$	460	7650
支架	钢	52.34	480	7850
等效绝缘槽	环氧树脂	0.187	1337.65	210.3

定子绕组和铁芯温度升高后将通过自然对流方式加热周围空气, 属于密闭空间内自然对流传热问题, 李世武等<sup>[14]</sup>通过计算验证了 in 低 Ra 数情况下使用可压缩理想气体模型的准确性, 本计算选择压力-速度耦合求解器进行求解, 使用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型, Enhanced wall treatment 壁面函数, 压力项选择 body force weighted, 其余空间离散格式均采用二阶迎风格式, 瞬态计算采用一阶迎风格式<sup>[15]</sup>。辐射模型采用 DO 辐射模型。管道壁面为定壁温边界条件 (温度为  $26.85^\circ\text{C}$ ), 左右两侧空气

壁面设为绝热壁面，对称面为对称边界，其余壁面均为 Coupled wall；能量项收敛判据为  $10^{-6}$ ，其他项为  $10^{-3}$ ；通电发热阶段瞬态时间步长设为 0.1s，通电时间 4s，断电后时间步长设为 10s，冷却散热 2h 后停止计算，初始温度场为 26.85℃。计算工况如表 2 所示。

表 2 计算工况

Table 2 Calculation conditions

工况	压力/atm
1	0.005
2	0.01
3	0.02
4	0.05
5	0.1

### 2.3 网格尺寸分析

为了更准确的计算表面换热系数，需要对定子和支架附近空气区域进行局部加密处理，分别设计 12mm、10mm、8mm 和 6mm 四种不同大小的加密网格，四种网格的总数量分别为 160 万、176 万、247 万和 313 万。对比分析了不同网格下通电 4s 后线圈表面的换热量大小，如图 3 所示。在加热线圈温度较低时，12mm 网格下的换热量与其他三种有较大差异，加密网格为 10mm、8mm 和 6mm 的计算结果在整个计算时间内吻合度较高，考虑到散热过程线圈表面温度长时间处在较低温状态，综合网格数和计算资源等加密区网格使用 10mm。固体域及远端空气域采用六面体网格，固体区域网格划分如图 4 所示。

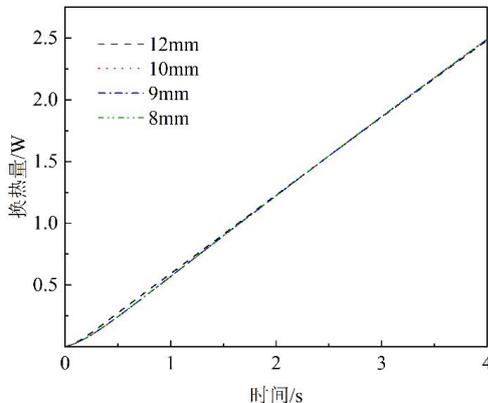


图 3 线圈表面换热量随网格尺寸变化图

Fig.3 Graph of coil surface heat transfer variation with grid size

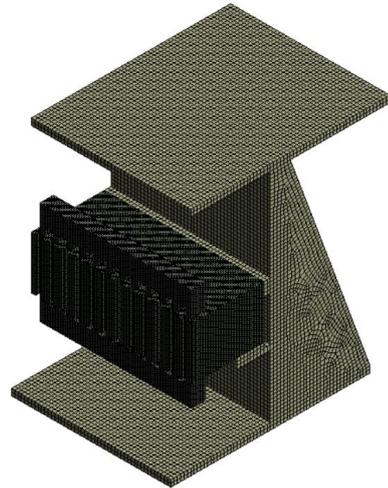


图 4 固体域网格

Fig.4 Solid domain mesh

## 3 结果分析

### 3.1 定子温度变化

在管道内压力为 0.005atm 时，定子及支架温度变化如图 5 所示。线圈温度在 10min 内迅速降低，从 40.85℃ 降至 29.85℃；支架温度逐渐升高，刚开始升温快随后升温缓慢并在与铁芯温度达到相同时开始缓慢降温；铁芯处在线圈与支架中间，首先吸收线圈传递的热量温度迅速升高，在 6.5min 时平均温度达到最大值 30.85℃，之后由于向支架传递的热量大于从线圈吸收的热量，温度开始降低，最后三者温度相同。

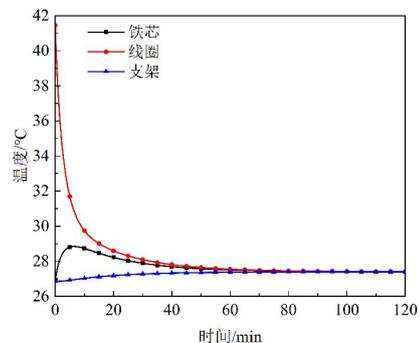


图 5 各物体温度随时间变化曲线

Fig.5 Curve of the temperature change over time

停止通电 5、10、15 和 20min 后直线电机定子温度云图如图 6 所示。在 5min 时线圈的温度就已经低于 31.85℃，可见热量传导过程非常迅速，但是还未见支架有明显温升；10min 时，支架与铁芯接触的两个部位已经开始出现温升，并且在 15 和

20min 时支架的高温区域不断扩大, 虽然此时铁芯整体温度已经开始下降, 但支架的高温区域仍将继续扩大一段时间, 可见定子的结构对散热过程和温度场有着重要的影响。

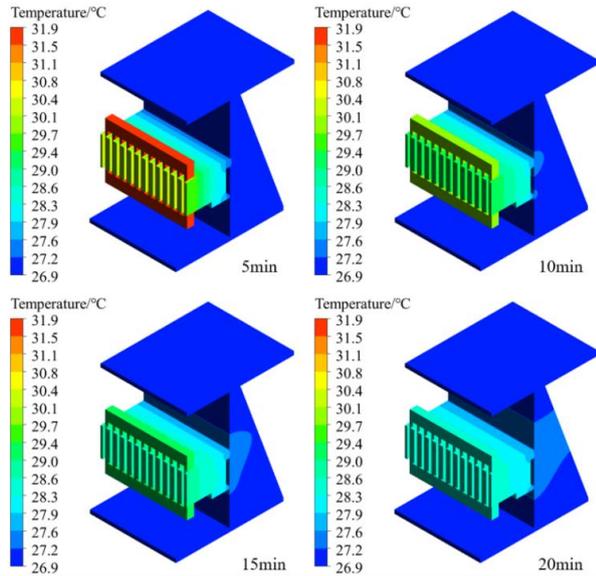


图 6 停止通电 5、10、15 和 20min 后直线电机定子温度云图

Fig.6 Temperature cloud of the linear motor 5, 10, 15, and 20 minutes after power off

### 3.2 定子散热随压力的变化

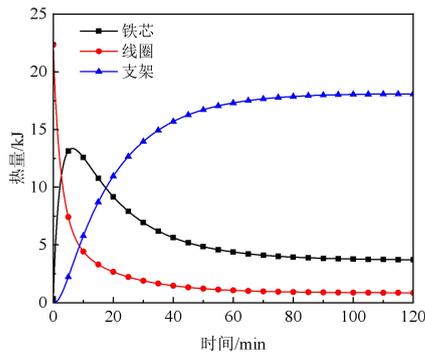


图 7 各物体热量随时间变化曲线

Fig.7 Curve of the thermal energy change over time

定子线圈在通电时间内所产生的总热量为 22.84kJ, 由于管道内压力低, 对流换热能力弱, 定子线圈产生的热量主要通过导热的方式进行传递。图 7 所示为压力为 0.005atm 时管道内各物体的热量随时间的变化, 可以发现热量不断地从线圈传递给铁芯和支架。铁芯热量先升高后降低是因为线圈的热量很快传递给铁芯, 而铁芯温度升高并传递到

支架需要时间, 当与支架接触的铁芯部位温度升高到 28.85°C 后, 由铁芯传递出去的热量会大于从线圈吸收的热量, 铁芯所含热量下降。由于支架的质量与热容大, 故其在三者温度相同时所含热量最大, 占总热量的 79.13%, 铁芯次之, 占总热量的 16.25%, 线圈占总热量的 3.76%, 其余 1% 的热量则通过自然对流传递到空气中。

表 3 所示为不同压力下管内热量不同传递路径的占比。从表中可以发现冷却散热 2h 后通电线圈产生的热量只有极小部分散失到空气中, 大部分热量则通过导热的方式传递给了铁芯及支架。随着管道压力的增大, 散发到空气及管道外的热量占比逐渐升高, 但即使在压力为 0.1atm 时通过对流和辐射方式所散失的热量也不到总散热量的 5%, 压力低于 0.1atm 时则更少, 这一方面是由于压力低, 空气稀薄导致空气带走热量的能力弱, 另一方面则是相比于对流和辐射, 线圈与铁芯和支架间的导热更快, 随着时间推进热量很快传递出去, 定子线圈的温度迅速降低, 辐射散热能力也迅速减弱。

表 3 2h 后不同压力下各物体所含热量占比

Table 3 The proportion of thermal content in objects under varying atmospheric pressure two hours later

压力/atm	铁芯	线圈	支架	空气及管外
0.005	16.25%	3.76%	79.16%	0.83%
0.01	16.22%	3.75%	78.97%	1.05%
0.02	16.17%	3.74%	78.70%	1.38%
0.05	16.04%	3.71%	78.03%	2.22%
0.1	15.86%	3.67%	77.21%	3.25%

当列车在压力为 0.005atm 的管道中多次运行时, 其热量将逐渐累积在铁芯、线圈和支架中, 忽略散失到空气中的热量, 散热 1 小时后铁芯、线圈和支架的温度几乎相同, 根据式 (6) 可以得知多次运行后定子的温升情况:

$$nQ = \left( \sum_i C_{pi} m_i \right) \Delta T \quad (6)$$

式中:  $n$  为列车运行次数;  $Q$  为运行一次线圈产生的热量;  $C_{pi}$  为第  $i$  个物体的比热;  $m_i$  第  $i$  个物体的质量,  $\Delta T$  为运行  $n$  次后定子的温升。

图 8 是不同压力下线圈表面对流换热热量随温度的变化趋势。温度越高, 对流换热能力越强, 压力越大, 对流换热能力也越强, 分别体现对流驱动力

和空气密度对自然对流换热能力的影响。在温度较低时，压力对对流换热能力的影响较小，在温度较大时，压力的影响更加明显，可以看出，在与空气温差较小时，温度是影响自然对流换热能力的主要因素，在与空气温差较大时，压力对自然对流换热的影响更大。

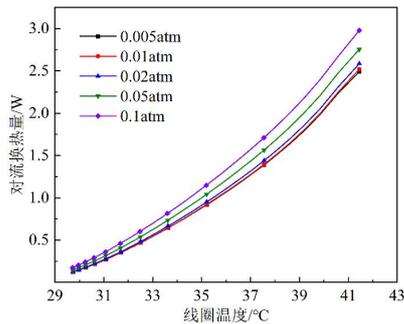


图 8 不同压力下线圈表面对流换热热量随温度的变化曲线  
Fig.8 Curve of convective heat transfer on the surface of a coil under different pressure with temperature.

### 3.3 辐射换热与对流换热比较

辐射换热与环境气体的压力是无关的，而在低压环境中，对流换热系数大大减小，当管道压力从 100 kPa 降至 1kPa 时，自然对流换热系数将减小 70%以上<sup>[16,17]</sup>。图 9 所示为线圈表面辐射换热与对流换热之比随时间的变化趋势。可以发现，定子线圈辐射换热热量远大于自然对流换热热量，并且随着温度的逐渐降低，辐射散热量占比升高；管道内压力升高后，对流换热热量增大，而辐射换热热量不发生变化，故辐射换热与对流换热之比逐渐减小。由此可见在该计算条件中辐射换热与对流换热具有相同大小的数量级，但是相比于导热而言，线圈通过辐射换热散发的热量仍然很小，但是当电机温度很高时，就不能直接简单的忽略辐射的影响。

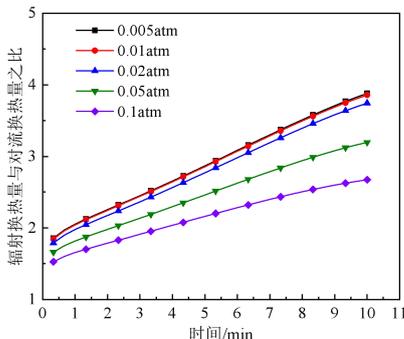


图 9 线圈表面辐射换热与对流换热之比随时间变化曲线  
Fig.9 Curve of the ratio of radiant heat transfer to convective heat transfer over time

## 4 结论

本文对真空管道直线电机定子通电及散热阶段的瞬态温度场进行了仿真研究，分析了定子温度场随时间的变化规律，以及定子散热随管道压力的变化，可以得出以下结论：

(1) 通电 4s 后线圈温度瞬间升高 14.6℃，经过 2h 散热后线圈温度为 27.4℃，线圈在此运行时间间隔下温升很小，但在多次运行时需要考虑热量积聚带来的影响。

(2) 在管道内压力为 0.005atm 时，通电线圈产生的热量主要通过导热传递，占比超过 99%。通过自然对流和辐射传递的热量非常小。

(3) 管道压力为 0.005atm 至 0.1atm 范围时，线圈表面辐射换热热量大于对流换热热量，并且随着温度的升高及管内压力的增大，辐射换热热量与对流换热热量之比减小；在真空环境中进行电机散热计算时不能简单忽略辐射换热的影响。

### 参考文献：

- [1] 邓自刚,张勇,王博,等.真空管道运输系统发展现状及展望[J].西南交通大学学报,2019,54(5):1063-1072.
- [2] 汤友富.超级高铁发展趋势及关键问题分析[J].铁道建筑技术,2019,(4):1-4.
- [3] 冯仲伟,方兴,李红梅,等.低真空管道高速磁悬浮系统技术发展研究[J].中国工程科学,2018,20(6):105-111.
- [4] 沈志云.高速磁浮列车对轨道的动力作用及其与轮轨高速铁路的比较[J].交通运输工程学报,2001,(1):1-6.
- [5] 佟来生,李海涛,张文跃,等.磁浮列车悬浮电磁铁温度场分析与散热优化研究[J].电力机车与城轨车辆,2022,45(4):13-18,24.
- [6] 章九鼎.中速磁浮列车长定子直线电机的性能分析与研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [7] 王晓远,高鹏.等效热网络法和有限元法在轮毂电机温度场计算中的应用[J].电工技术学报,2016,31(16): 2633.
- [8] 魏龙涛,胡站伟,杨升科,等.真空管道列车悬浮电磁铁散热性能研究[J].装备环境工程,2022,19(6):141-146.
- [9] 张俊博,李红梅,王俊彪,等.低真空管道磁悬浮列车温度场数值计算[J].真空科学与技术学报,2021,41(5): 448-455.
- [10] 殷乃睿,刘洪武,陈琳,等.基于流体仿真软件对电磁铁的温升分析[J].低压电器,2013(12):8-11.

- Management, 2020,214:112896.
- [2] 宋梦宇,王林,曹艺飞,等.太阳能吸收/压缩复叠双温制冷系统特性研究[J].工程热物理学报,2021,42(7):1651-1658.
- [3] 何慧,王林,陈忠梅,等.高蒸发温度下小型太阳能单效溴化锂吸收式制冷机组性能试验研究[J].制冷与空调,2018,18(12):89-94.
- [4] Fong K F, Chow T T, Lee C K, et al. Solar hybrid cooling system for high-tech offices in subtropical climate—Radiant cooling by absorption refrigeration and desiccant dehumidification[J]. Energy Conversion and Management, 2011,52(8-9):2883-2894.
- [5] Habib M F, Ali M, Sheikh N A, et al. Building thermal load management through integration of solar assisted absorption and desiccant air conditioning systems: A model-based simulation-optimization approach[J]. Journal of Building Engineering, 2020,30:101279.
- [6] Fong K F, Lee C K, Chow T T, et al. Solar hybrid air-conditioning system for high temperature cooling in subtropical city[J]. Renewable Energy, 2010,35(11):2439-2451.
- [7] Chun L, Gong G, Peng P, et al. Research on thermodynamic performance of a novel building cooling system integrating dew point evaporative cooling, air-carrying energy radiant air conditioning and vacuum membrane-based dehumidification (DAV-cooling system)[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 245:114551.
- [8] Liu D, Yuan L, Chun L, et al. Thermodynamic performance analysis of a novel air conditioning system integrating solar absorption compression refrigeration and vacuum membrane-based dehumidification (SACV)[J]. Energy and Buildings, 2023, 288:113021.
- [9] Yu J, Li Z, Chen E, et al. Experimental assessment of solar absorption-subcooled compression hybrid cooling system[J]. Solar Energy, 2019,185:245-254.
- [10] Chen E, Chen J, Jia T, et al. A solar-assisted hybrid air-cooled adiabatic absorption and vapor compression air conditioning system[J]. Energy Conversion and Management, 2021,250:114926.
- [11] Cimsit C, Ozturk I T. Analysis of compression-absorption cascade refrigeration cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2012,40:311-317.

---

(上接第 298 页)

- [11] 张俊博.基于流固耦合的低真空管道磁悬浮列车传热仿真研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2021.
- [12] Zhou YL, Bi HQ, Wang HL, et al. Fire characteristics of rescue station inside railway tunnel with semi-transverse ventilation[J]. Tunnelling and underground space technology, 2020,98,103303.
- [13] 尹惠.永磁同步电机损耗计算及温度场分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- [14] 李世武,熊莉芳.封闭方腔自然对流换热的研究[J].工业加热,2007,(3):10-13.
- [15] 杨小川.复杂热环境中大型薄壳体内的自然对流数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [16] 林晖,杨忠衡,秦旭进,等.低气压下低温空气水平圆管自然对流换热系数测量[J].制冷技术,2019,39(1):16-20.
- [17] 刘崇喜,卢军,郑洁.基于不同大气压力下多种翅片型式换热器的换热特性仿真模拟研究[J].制冷与空调,2018,32(3):215-220.