

研
究
开
发磁悬浮列车用混合悬浮电磁铁
温度场建模与仿真

刘少克

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)



作者简介：刘少克(1963-)，男，博士，教授，主要从事磁悬浮技术、电机及其控制方面的教学、科研工作。

摘 要：建立了中低速磁悬浮列车用混合悬浮电磁铁的 Maxwell 二维温度场仿真分析模型，对其温度场特性进行了分析，并与传统纯电动励磁结构的悬浮电磁铁进行了比较。针对工程实际样车用混合悬浮电磁铁分析指出，电磁铁最高温度位于励磁线圈中心处，铁心轭部温度与励磁线圈温度基本相同。采用混合悬浮电磁铁结构不仅大大降低了悬浮损耗，减少了列车运行能耗，而且改善了悬浮电磁铁的温度特性。

关键词：磁悬浮列车；混合悬浮；悬浮电磁铁；温度场；有限元法

中图分类号：U292.91⁺7；TP391.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2011)06-0032-03

Modeling and Simulation of Temperature Field for Mixing Suspension
Electromagnet of Maglev Train

LIU Shao-ke

(The College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: 2D Maxwell temperature field simulation model of the mixing suspension electromagnet for mid-low speed maglev train was established. The temperature characteristics were analyzed and the corresponding calculation results were compared with the tradition structure. The simulation analysis for one engineering vehicle showed that the highest temperature point of the mixing electromagnet lied at the exciting winding center and the temperature of the iron core yoke was near the same as the exciting winding. The suspension energy loss and energy consumption in train running were greatly reduced and the temperature characteristics were also improved when the mixing electromagnet was used.

Key words: maglev train; mixing suspension; suspension electromagnet; temperature field; finite element method

0 引言

中低速磁悬浮列车是一种新型城市轨道交通工具，它通过车体上的 U 型悬浮电磁铁线圈通电后产生与 F 型轨道的电磁吸力来悬浮列车，采用直线感应电机牵引方式。传统悬浮电磁铁采用纯电动励磁线圈方式，近年为了降低悬浮能耗，节省列车运行能源，一些学者尝试采用永磁和电励磁混合悬浮电磁铁结构。采用混合悬浮电磁铁，列车正常悬浮时，其悬浮能耗接近零。在结构上，混合悬浮电磁铁在 U 型铁心磁路中嵌入了永磁磁体，而钕铁硼永磁磁体存在一定的温度退磁，

当温度超过永磁体最高允许值时，其退磁是不可逆的，将永久性地对其磁性能造成损害。故此，有必要对混合悬浮电磁铁的温度特性进行分析，以确保其工作在允许温度范围内。

1 二维数值建模

与电磁场的计算类似，当采用 Maxwell 2D 进行温度场的计算时，需经选择求解器、建立几何模型、指定材料属性、指定边界条件和激励源、设定求解参数和进行网格划分等几个步骤。这里二维温度场分析选择稳态温度场 (Static Thermal) 分析模块。按照混合悬浮电磁铁实际尺寸建立二维几何模型如图 1 所示。与电磁场计算建模不同，由于电磁铁通过两边极板与车体紧密连接在一起，故此，必须考虑车体对电磁铁的散热作用。

收稿日期：2011-03-23

基金项目：“十一五”国家科技支撑计划重点项目 (2006BAG02B05)

混合悬浮电磁铁发热器件主要为U型铁心上的励磁线圈。线圈通电时,线圈导体产生热量(铜损),其热量主要通过热传递和热对流方式作用在U型铁心轭部和周围流动的空气上。在电磁铁温度场分析中,同时存在以下3类边界条件:

- ①第一类边界条件:工作环境(空气)温度;
- ②第二类边界条件:线圈、铁心、永磁体、车体与空气对流散热;
- ③第三类边界条件:线圈与铁心、铁心与永磁体、铁心与车体之间的传导散热。

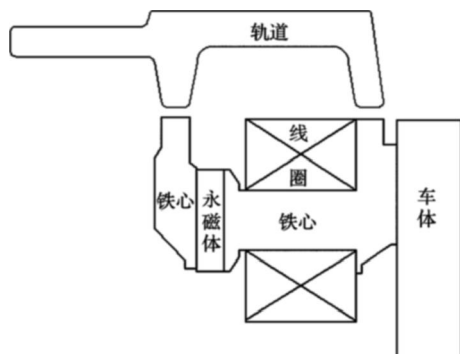


图1 混合悬浮电磁铁二维模型

混合悬浮电磁铁产生的热量主要为励磁线圈的铜损,按照 $W=I^2R$ 计算,其中 I 为线圈中的电流, R 为线圈电阻,根据线圈导体实际情况取值。

混合悬浮电磁铁温度场计算基于如下假设:

①磁悬浮列车在运行状态与静止悬浮状态下由于空气流速不同,其对流传热系数不同,在运行时对流传热系数较大,利于电磁铁散热,故满足静止悬浮下的温度条件要求一定能够满足列车运行时的要求。为此,计算时假设列车处于静止悬浮状态,即取自然对流传热系数来对其温度场进行分析。

②假定周围环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,不随时间以及电磁铁温度的变化而变化。

③励磁线圈间绝缘层对传热的影响忽略不计,只考虑线圈最外绝缘层的影响,通过在模型中设置导热系数较低的薄层实现。

④忽略交流谐波电流分量引起的附加铁损耗。

⑤不计热辐射作用。

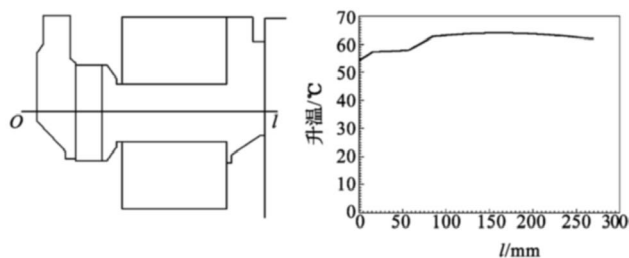
2 仿真分析

2.1 混合悬浮电磁铁的温度

本文针对一工程实际磁悬浮列车用悬浮电磁铁进行分析计算,其单体混合悬浮电磁铁参数为:永久磁铁横截面积为 0.055 m^2 ,厚度为 28 mm ,U型电磁铁铁心两边磁极极板宽度 28 mm ,电励磁线圈匝数240匝。

对不同线圈电流下混合悬浮电磁铁的温度场进行计算表明,电磁铁内部各处的温度并不相同。图2示出了线圈电流 30 A 下电磁铁铁心和永磁体中心线的温度分布情况。由图2可见,铁心轭部位于励磁线圈位置处

的温度为 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$,而靠永磁侧的铁心极板为 $57.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,轭部温度略高,这应该是因为永磁体的传热能力与铁心不一样引起的。



(a) 电磁铁横截面图

(b) 横截面中心线温度

图2 线圈电流 30 A 下电磁铁各部分位置处的温度

电磁铁最高温度位于励磁线圈中心处,因励磁线圈紧紧包裹铁心轭部,铁心材料导热系数较高,故铁心轭部温度与励磁线圈温度基本相同。

电磁铁的稳态温度随着线圈电流的增大而升高。图3为混合悬浮电磁铁的最高温度随线圈电流的变化曲线。由图3可见,当励磁线圈电流小于 40 A 时,电磁铁最高温度增高较慢;但当大于 40 A 时,最高温度与线圈电流成比例快速上升。

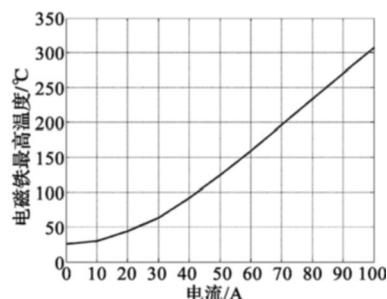


图3 混合悬浮电磁铁最高温度与电流关系

通过对混合悬浮电磁铁的电磁力计算表明,正常悬浮 8 mm 气隙下,励磁线圈电流很小,只有 2.5 A ,悬浮电磁场主要依靠永久磁铁产生,故此,正常工作情况下混合悬浮电磁铁的温升很小^[4]。对混合悬浮电磁铁的电磁力计算同时表明,在列车开始悬浮 18 mm 气隙时,线圈电流 18 A ,而极端防吸死情况,最小气隙 3 mm 下线圈反向电流 41.7 A 。上述线圈电流引起温升后的温度均在永磁体允许的工作温度范围;同时考虑列车起浮和防吸死工作状态的持续时间均很短,故正常情况下混合电磁铁的温度并不高,不必担心电磁铁温度引起的永磁体退磁问题,但要注意的是,要避免长时间 60 A 以上的非正常励磁线圈电流。

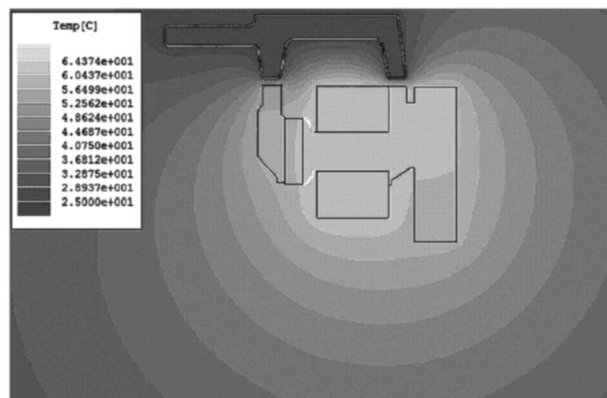
2.2 温度场分析

图4给出了线圈电流 30 A 混合悬浮电磁铁内部的温度场分布。在 30 A 电流下,最高温度为 $64.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

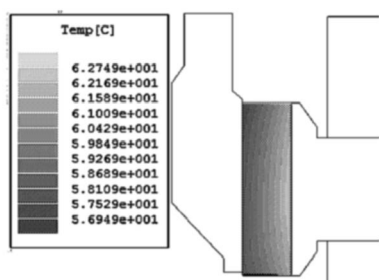
由图4可见,励磁线圈及其周边温度最高,而靠F型轨道内侧的线圈比外侧的线圈温度略高。靠永磁体一侧的铁心外极板比另一侧铁心内极板温度明显要低。由于良好的导热性和悬浮气隙的存在,F型轨道本身温度很低;但F型轨道的存在,明显改变了悬浮电磁铁温度场的分布。

实际条件下,磁悬浮列车混合悬浮电磁铁中的钕铁硼永磁体允许最高温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,远高于 40 A

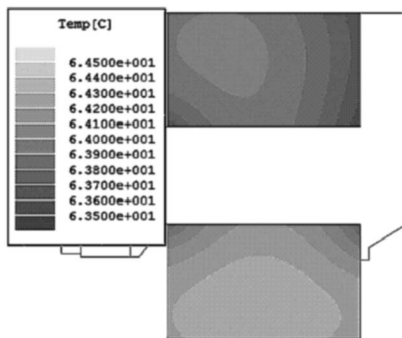
电流强度下永久磁铁的最高温度 $89\text{ }^{\circ}\text{C}$, 所以, 在正常的工作情况下永磁体工作性能不会受到高温的威胁。



(a) 悬浮电磁铁整体



(b) 钕铁硼永磁



(c) 励磁线圈

图4 线圈电流 30 A 时混合悬浮电磁铁温度场

2.3 混合悬浮电磁铁与传统电磁铁温度场比较

为了比较, 本文建立了传统悬浮电磁铁的 Maxwell 2D 模型, 并计算了其在不同线圈电流下的最高温度。传统悬浮电磁铁没有钕铁硼永磁磁体, 线圈匝数 360 匝, 其他几何结构尺寸与混合悬浮电磁铁的一样。图 5 示出了 2 种悬浮电磁铁的最高温度对比。

2 种电磁铁最高温度点均位于励磁线圈中心, 在相

同的悬浮电流条件下两者最高温度相差不大, 传统电磁铁温度稍高于混合悬浮电磁铁最高温度是因为传统电磁铁的线圈电阻略大。实际上, 由于混合电

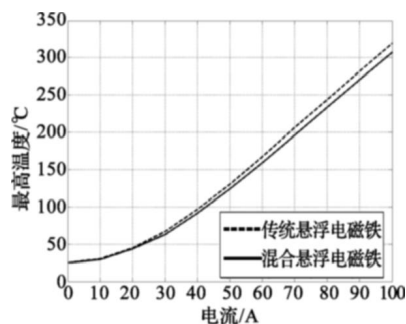


图5 2 种悬浮电磁铁的最高温度比较

磁铁悬浮磁场主要通过永磁体来产生, 故在提供相同悬浮力条件下, 混合悬浮电磁铁的励磁线圈电流要远小于传统悬浮电磁铁的线圈电流。所以, 采用混合悬浮电磁铁结构不仅大大降低了悬浮损耗, 减小了列车运行能耗, 而且改善了悬浮电磁铁的温度特性。

3 结语

采用混合悬浮电磁铁结构是随着永磁材料的发展而在磁悬浮列车中出现的一种新的节能技术, 对其在应用过程中可能出现的一些悬浮力大小、是否可能引起温度退磁等问题进行研究, 有重要的工程实际意义。本文通过对一实际磁悬浮列车用混合电磁铁样车研究表明, 钕铁硼永磁体用于磁悬浮列车悬浮是可行的。

参考文献:

- [1] 刘少克, 倪鸿雁, 张葵葵. 基于数值分析的磁浮列车悬浮电磁铁电磁场分布研究 [J]. 铁道学报, 2007, 29(6): 40-43.
- [2] 李云钢, 闫宇壮, 程 虎. 混合 EMS 型磁浮列车的悬浮磁铁设计与分析 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 95-98.
- [3] 刘少克, 郭忠君, 郑明华, 陈贵荣. 中低速磁浮列车用混合电磁铁磁场与电磁力分析 [J]. 机车电传动, 2010(3): 20-23.
- [4] 田文静. 两种典型中低速磁浮列车悬浮电磁铁电磁特性研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [5] Chang-Chou Hwang, Wu S S, Jiang Y H. Novel approach to the solution of temperature distribution in the stator of an induction motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(4): 401-406.
- [6] Rajagopal M S, Aswatha Narayana P A, Quadir G A, et al. Numerical and experimental heat transfer studies on totally enclosed fan ventilated machines [J]. Electric Power Components and Systems, 2002, 30(8): 791-806.
- [7] 陈贵荣, 等. 钕铁硼永磁体在磁悬浮技术中的应用 [J]. 稀土, 2007, 28(6): 99-101.
- [8] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. ANSOFT 工程电磁场有限元分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 241-245.