

文章编号: 1001-2486(2006)05-0094-05

## 混合 EMS 型磁浮列车的悬浮磁铁设计与分析\*

李云钢, 闫宇壮, 程 虎

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:**研究适用于 EMS 型磁浮列车的全尺寸电磁永磁混合悬浮磁铁的设计问题。通过比较永久磁铁的不同安装位置的影响, 给出混合磁铁的结构方案。根据混合磁铁吸力公式, 得出只有在永久磁铁矫顽力大于一定值时利用混合磁铁才能减小悬浮能耗。分析了混合磁铁的设计要求, 研究满载起浮、稳态悬浮、空载吸死三种典型情况下对电磁线圈窗口高度的约束, 得出混合磁铁的优化设计参数。最后利用 Ansoft 有限元磁场分析软件对钕铁硼永磁材料的拼装影响进行分析, 给出校正后的悬浮磁铁设计结果。

**关键词:**EMS 磁浮列车; 永久磁铁; 磁铁设计; 有限元

**中图分类号:**U292.917 **文献标识码:**A

## Design and Analysis of the Hybrid Magnet in EMS Maglev Vehicles

LI Yun-gang, YAN Yu-zhuang, CHENG Hu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** This paper researches into the design of the full-scale hybrid magnet in EMS Maglev train. The hybrid magnet was made by combining electromagnet with permanent magnet (PM). Considering the different effects of the positions that PM fixed on, the structure scheme of the hybrid magnet was presented. The analysis result of the hybrid force shows that hybrid magnet can reduce the suspending power as far as the PM has a bigger coercive force. According to the design requirements, the paper also calculated the restriction on the height of the coil's window with its width treated as a constant under the following three typical conditions: rising up at full load, suspending steadily at rated load, and attracting together at zero load. The optimized parameters of the hybrid magnet were thus attained. Finally, based on the FEA (Finite Element Analysis) software, Ansoft Maxwell, the patching up effect of the NdFeB was simulated, and the revised design results were presented.

**Key words:** EMS Maglev; permanent magnet; magnet design; FEA(finite element analysis)

EMS 型磁浮列车的悬浮磁力是由励磁电流产生的, 因此实现悬浮需要额外的能耗。这个能耗约为 800W/t, 其对于面向城轨应用中低速磁浮列车来说, 在运营能耗中占了相当的比重, 有必要进一步减小悬浮能耗。减小能耗的方法之一是利用永久磁铁来提供主要的悬浮力, 而用较小电磁力来维持平衡。这种混合悬浮技术正受到国内外广泛关注和研究。美国 MagneMotion 公司研制成功 M3 系统<sup>[1]</sup>, 通过混合悬浮将悬浮能耗减小到 200W/t; 中科院电工所研制了 80kg 的小型混合悬浮样车<sup>[2]</sup>; 国防科技大学在一台承载 30kg 的混合悬浮装置上, 实现了零电流悬浮。本文将开展满足工程应用要求的全尺寸混合型磁铁设计研究, 为混合型中低速磁浮列车走向实际应用奠定基础。

### 1 混合磁铁结构设计

#### 1.1 中低速磁浮列车电磁铁结构及其特点

中低速磁浮列车通常采用 U 型电磁铁和倒 U 型轨道结构<sup>[3]</sup>, 见图 1, 这种结构在导向方向实现了自稳, 可以减小系统复杂程度。图 1 中的典型参数为极长  $a = 84\text{cm}$ , 极宽  $b = 2.8\text{cm}$ , 起浮间隙 20mm, 额定悬浮间隙 10mm。利用该电磁铁, 可以产生 10kN 以上的悬浮力, 而悬浮能耗为 800W/t。

\* 收稿日期: 2005-12-15

作者简介: 李云钢(1969—), 男, 副教授, 博士。

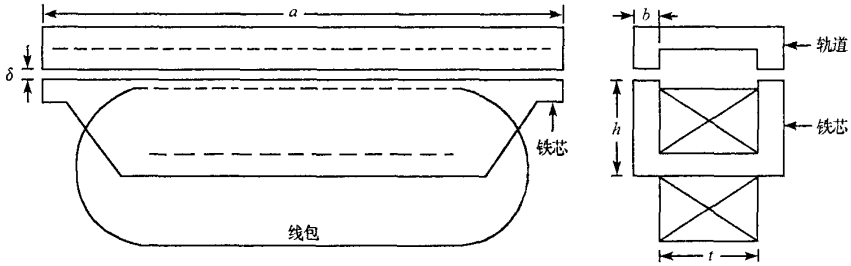


图 1 某磁浮列车悬浮电磁铁结构

Fig.1 Structures of the levitation magnet in a maglev train

### 1.2 改造原则与方案

为了减小悬浮能耗,需要对该电磁铁进行改造。本文的改造措施是在磁铁铁芯上加装永久磁铁,改造时要求满足以下原则:

- (1) 混合磁铁与现有磁铁的安装结构和轨道结构兼容,以便在现有车辆上安装,并利用现有的轨道进行实验。
- (2) 混合磁铁结构要便于永久磁铁散热,以满足永磁材料的工作温度要求。
- (3) 混合磁铁应便于加工和维护。

两种可能的改造方案见图 2,其中,(a)图将永久磁铁安装在磁极表面,(b)图将永久磁铁安装在磁铁轭部。相比而言,(a)图方式便于永久磁铁散热,且加工维护方便,因此本文以之为基础进行详细设计。

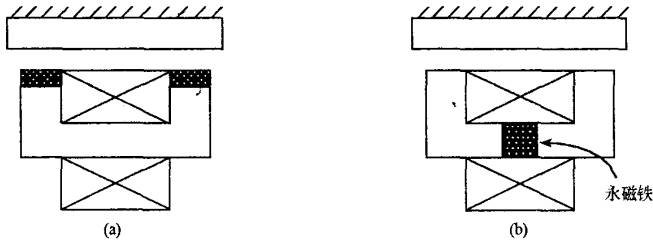


图 2 U 型混合悬浮系统结构模型

Fig.2 U-type hybrid magnet

## 2 基于近似公式的混合磁铁设计

### 2.1 采用永磁材料可以减小悬浮能耗的条件

图 2(a)所示 U 型混合磁铁与轨道之间的吸力  $F_m$  为<sup>[4-5]</sup>:

$$F_m = \frac{\mu_0}{4} \left( \frac{NI + 2H_c\delta_m}{\delta + \delta_m/\mu_m} \right)^2 S \quad (1)$$

其中, $\delta$  为悬浮间隙, $\mu_0$  为真空磁导率, $H_c$  为永磁矫顽力, $\mu_m$  为永磁材料的相对磁导率, $\delta_m$  为永久磁铁高度, $S$  为磁极面积, $N$  为线圈匝数, $I$  为线圈电流。

由于  $\mu_m \approx 1$ ,增加永磁材料尽管增加了磁势,但也相当于增大了气隙,因此有必要对增加永久磁铁之后的效果做定量分析。将式(1)对  $\delta_m$  求偏导数,得:

$$\frac{\partial F_m}{\partial \delta_m} = \frac{\mu_0 S}{2} \cdot \frac{(NI + 2H_c\delta_m) \cdot (2H_c\delta - NI/\mu_m)}{(\delta + \delta_m/\mu_m)^3} \quad (2)$$

注意到  $\frac{\mu_0 S}{2}$ 、 $(NI + 2H_c\delta_m)$ 、 $(\delta + \delta_m/\mu_m)$  都大于零,因此  $\frac{\partial F_m}{\partial \delta_m} > 0$  的充要条件是  $(2H_c\delta - NI/\mu_m) > 0$ ,即

$$H_c > \frac{NI}{2\delta\mu_m} \quad (3)$$

由此可见,只有使用矫顽力足够大的永磁材料,增加其高度才可能增加悬浮力,换言之,对于矫顽力足够大的永磁材料,增加其高度之后,要达到同样的悬浮力,可以使用较小的励磁电流,从而减小悬浮能耗。对于工程应用车,可计算出对永磁材料要求最小矫顽力为 500kA/m 左右。钕铁硼材料的矫顽力通常为 800~1000kA/m,故能满足应用要求。

## 2.2 混合磁铁设计的基本要求和设计依据

进行混合磁铁设计的基本要求和依据如下:

- (1) 单个磁铁额定承载不小于 10kN,额定间隙 8mm,并能实现 16mm 起浮。
- (2) 列车空载时折算到每个磁铁的重量为 6kN。
- (3) 为了减小悬浮能耗,应尽可能利用永久磁铁来提供悬浮力,而电磁线圈尽量小。计算时,选取钕铁硼永久磁铁的矫顽力为 900kA/m,剩磁为 1.1T。
- (4) 永久磁铁的宽度和电磁铁磁极宽度  $b$  相同。
- (5) 沿长度方向采用小块永久磁铁拼装,见图 3。小块永久磁铁长 50mm,两块之间的接缝在 1~5mm 之间选取。初步计算时暂不考虑接缝带来的磁力损失。
- (6) 小块磁铁接缝中的填充材料高出永久磁铁表面 1mm,使得永久磁铁和轨道之间至少有 1mm 的间隙,以保护永久磁铁,同时,也使得可用较小的反向电流来防止吸死。
- (7) 为减轻重量和成本,电磁线圈采用铝导线。
- (8) 电磁线圈正常工作时的电流较小,但在起浮和抗吸死时会出现较大的短时电流,为了提高线圈利用率,铝导线的持续电密取为  $J_1 = 1.2\text{A}/\text{mm}^2$ ,而短时最大电密取为  $J_2 = 6.0\text{A}/\text{mm}^2$ 。
- (9) 线圈填充系数取为  $\eta = 0.75$ 。
- (10) 电磁线圈窗口宽度和现有磁铁一致,均为  $d$ ,以和现有结构兼容。

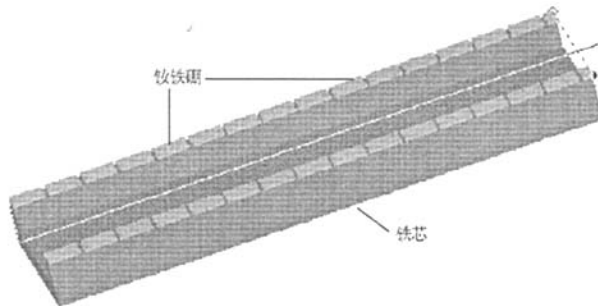


图 3 小块永久磁铁的拼装示意图

Fig.3 Patch up with pieces of permanent magnet

## 2.3 永久磁铁高度和电磁线圈窗口高度的初步设计

根据上述条件,可以计算出对应特定  $\delta_m$  下的正向起浮、反向防吸死以及额定间隙下的持续悬浮所需的电磁线圈的磁势要求,从而计算出所需的窗口高度  $h_{\min}$ 。具体地,正向起浮的最小窗口高度由式(4)给出,反向防吸死的最小窗口高度由式(5)给出,额定悬浮所需的最小窗口高度由式(6)给出,而实际可选的窗口高度应是这三个值中的最大值,由式(7)给出。

$$h'_{\min}(\delta_m) = [2 \cdot \sqrt{\frac{m_{\max} g}{S \cdot \mu_0}} \cdot (\delta_{\max} + \delta_m / \mu_m) - 2 \cdot H_c \cdot \delta_m] / (d \cdot \eta \cdot J_2) \quad (4)$$

$$h''_{\min}(\delta_m) = -[2 \cdot \sqrt{\frac{m_{\min} g}{S \cdot \mu_0}} \cdot (\delta_{\min} + \delta_m / \mu_m) - 2 \cdot H_c \cdot \delta_m] / (d \cdot \eta \cdot J_2) \quad (5)$$

$$h''_{\min}(\delta_m) = [2 \cdot \sqrt{\frac{m_{\max} g}{S \cdot \mu_0}} \cdot (\delta + \delta_m / \mu_m) - 2 \cdot H_c \cdot \delta_m] / (d \cdot \eta \cdot J_1) \quad (6)$$

$$h_{\min}(\delta_m) = \max(h'_{\min}, h''_{\min}, h'''_{\min}) \quad (7)$$

其中,  $\delta_0$  为额定悬浮间隙,  $\delta_{\min}$  为吸死间隙,  $\delta_{\max}$  为起浮间隙;  $m_{\max}$  为额定载重,  $m_{\min}$  为空载重量;  $d$  为窗口宽度。

根据公式(4)~(7)和相应数据,得到最小窗口高度  $h_{\min}$  和永久磁铁高度  $\delta_m$  的对应关系如图 4 所示。由图 4 可以看出以下几点:

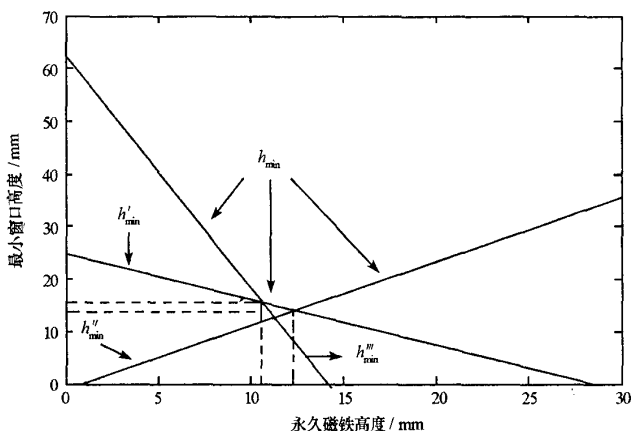


图 4 最小窗口高度和永久磁铁高度的关系曲线

Fig. 4 Relationship between the height of permanent magnet and the height of coil's window

(1) 随着永久磁铁高度的增加,所需窗口高度减小,但当  $\delta_m > 13\text{mm}$  以后,受反向防吸死的限制,不宜再增加永久磁铁高度。

(2) 当  $\delta_m > 10.5\text{mm}$  以后,增加永久磁铁高度对减小电磁铁的效果不显著。

(3) 综合来看,永久磁铁高度  $\delta_m$  应选为 10mm 左右,窗口高度应大于 18mm;为了保证有足够的余量,在获得实验数据之前,可初步选取窗口高度为 30mm。

需要说明的是,本文仅从磁铁设计的角度考虑了防吸死问题,真正做到防吸死还需要控制系统的配合。

### 3 基于有限元的核算与设计改进

为了对上述计算结果做初步检查,并分析漏磁以及小块磁铁拼装带来的设计误差,本文用 Ansoft 有限元分析软件对设计结果进行分析和核算。

#### 3.1 单个磁块尺寸为 50mm × 28mm × 10mm,接缝为 0、1mm、5mm

计算结果见图 5。从图 5 可以看出以下几点:

(1) 有限元计算结果与公式计算结果有较大的区别,有限元计算值约损失 2kN 的悬浮力。

(2) 接缝越大,吸力损失越大,5mm 接缝下约损失 1kN,可见应通过改进加工和安装工艺尽量减小接缝。

(3) 在电磁部分提供 5000 安匝的磁势下,若采用 1mm 接缝,约可得到 1t 的悬浮力,而在 5mm 接缝下,约可得到 9kN 的悬浮力。而此时的悬浮能耗相对于无永久磁铁,仅减小了 50%。

#### 3.2 单个磁块尺寸为 50mm × 28mm × 18mm,接缝为 2mm

该组参数下的计算结果见图 6。利用这组参数,在 4000 安匝的磁势下,可以得到 10kN 的悬浮力。计算还表明,在永久磁铁高度大于 25mm 以后,悬浮力随高度的增加变化不明显。

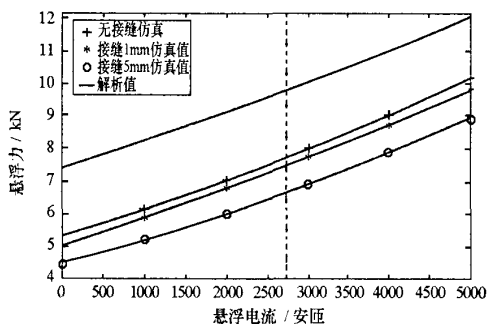


图5 永久磁铁高10mm的计算结果  
Fig.5 Levitation force as function of current permanent magnet at 10mm high

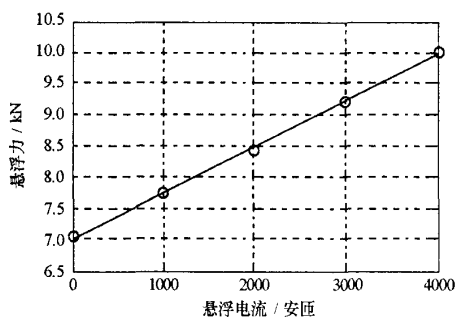


图6 永久磁铁高18mm的计算结果  
Fig.6 Levitation force as function of current permanent magnet at 18mm high

综合以上计算,本文最终设计的悬浮电磁铁结构参数如下:

- (1) 永久磁铁采用  $50\text{mm} \times 28\text{mm} \times 18\text{mm}$  的小磁块拼装,接缝 2mm。
- (2) 电磁线圈窗口尺寸(含永久磁铁高度):4cm。
- (3) 混合磁铁总重:82kg。
- (4) 悬浮静态励磁能耗:从空载到满载,悬浮功耗在 0~340W 变化。

#### 4 结论

研究了满足工程要求的全尺寸电磁永磁混合磁铁的设计问题。基于混合磁铁的电磁力模型,分析得出只有当永久磁铁矫顽力大于一定值时,利用它才能减小能耗;然后针对所选的 U 型混合磁铁,分析其设计要求,研究得出了电磁线圈窗口高度与永久磁铁高度的关系,在此基础上完成了混合磁铁的初步设计。利用有限元分析软件对设计结果进行核算,表明悬浮力较公式计算值有所减小,并应尽量减小接缝宽度。论文给出了校正后的悬浮磁铁设计结果。

#### 参考文献:

- [1] Thornton R. The M3 Urban Transportation System[R]. MagneMotion Inc. America: Federal Transit Administration as Part of FTA Project MA-26-7077, 2003.
- [2] Xu Shaohui, Xu Zhengguo, Jin Nengqiang, et al. Levitation Control Scheme for the Hybrid Maglev System without Acceleration Sensor[C]. China, Shanghai: The 18<sup>th</sup> International Conference on Maglev Systems and Linear Drivers, 2004.
- [3] 陈贵荣,常文森.磁悬浮列车悬浮电磁铁设计研究[J].国防科技大学学报,1993,15(4):10-15.
- [4] 龙志强,周晓斌,杨泉林,等.永磁式磁悬浮列车系统研究[J].机车电传动.1996,3:8-11.
- [5] Li Y G, Cheng H, Long Z Q. Stability Analysis and Controller Design of Hybrid EMS Maglev System[C]. Dresden, Germany: 8<sup>th</sup> ISMST, 2005.



