

## 磁悬浮列车悬浮电磁铁设计研究\*

陈贵荣 常文森 尹力明

(自动控制系)

**摘要** 本文简要地介绍了日本 HSST-03 磁悬浮列车的悬浮电磁铁结构形式,并应用电磁场的基本理论和分析方法,对该悬浮系统电磁铁设计的主要公式进行了详细的推导;对设计中的气隙磁密、磁铁长度、气隙大小等主要参数的选择进行了分析;进而归纳出了该悬浮系统电磁铁设计的方法和步骤。此外,本文还给出了应用该设计步骤和方法设计完成的 750kg 悬浮电磁铁的理论计算与实验测试曲线。

**关键词** 磁悬浮列车, 电磁场, 电磁铁设计

**分类号** O441.4

## 1 引言

磁悬浮列车已相继问世,并投入了营运。迄今为止,磁悬浮列车已逐渐形成成为常导型(EMS)和超导型(EDS)两种典型的悬浮结构型式。在采用 EMS 型悬浮结构的磁悬浮列车中,比较成功的有日本的 HSST 系列和德国的 TR 系列。这两种系列的悬浮结构在侧向采用了不同的控制方式:TR 系列采用了垂直方向和侧向单独控制的方法,结构设计简单,但所需控制器件较多,而 HSST 系列则采用了侧向自稳定的交错排列的悬浮电磁铁结构型式<sup>[1]</sup>,这种结构只须将侧向加速度信号加入垂直方向控制回路,达到侧向运动阻尼效果,其所需控制器件较少,但结构比较复杂,如图 1(a)所示。HSST 系列的设计计算公式和步骤须进行详细研究,而不能用一般的近似公式进行计算。

## 2 悬浮电磁铁设计公式分析推导

## 2.1 升力——侧向力分析及计算公式推导

## (1) 电磁吸力的一般计算公式

从电磁学理论可知,对均匀气隙,电磁吸力的一般计算公式为

$$F = \frac{\phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{B^2 \cdot S}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中,  $B$  ——气隙磁密,  $\phi$  ——气隙磁通,  $\mu_0$  ——空气磁导率,  $S$  ——极面积

公式(1)是在认为气隙磁通均匀垂直通过两极面,且忽略边缘效应的条件下来进行

\* 1993年1月25日收稿

静态电磁力计算的。因此,对图 1 (b) 所示的交错排列的电磁铁结构,由于各电磁铁均偏离了轨道中心线,所以要把公式 (1) 推广到存在边缘效应的情况。

(2) 电磁吸力的实用计算公式推导

对于 EMS 型磁悬浮列车来说,其悬浮系统均由一“U”型电磁铁和倒“U”型轨道构成<sup>[2]</sup>,如图 2 所示。此结构除可以产生垂直升力外,还可以产生

侧向导引力。下面从一般情况来推导上述结构的垂直升力和侧向导引力计算公式。

图 3 所示的“U”型电磁铁与倒“U”型轨道,其宽度不一致,铁芯极宽  $W$  相对工作气隙  $\delta$  来说是很宽的情况,那么,电磁铁各极上的升力与侧向力可表示为:

$$\begin{cases} \text{每极净升力} = \bar{F}_z \doteq \bar{F}_{zl} + \bar{F}_{zr} \\ \text{每极净侧向力} = \bar{F}_y \doteq \bar{F}_{yl} - \bar{F}_{yr} \end{cases} \quad (2)$$

这样就将升力、侧向力分成了各自一半,可以应用保角变换和四角几何来求解<sup>[3]</sup>。通过分极,使极宽在侧向有效地增加  $\Delta W$ ,并认为此时气隙磁密是均匀的,因而可用公式 (1) 进行计算。这个“附加宽度”是由于边缘效应对垂直升力也有贡献所致,所以,各极上的总升力又可表示为:

$$\bar{F}_{za} = \bar{F}_{za\mu} + \bar{F}_{zaf} \quad \alpha = l \text{ 或 } r \quad (3)$$

式中,  $\bar{F}_{za\mu}$  表示  $(0, W/2)$  极上均匀磁场产生的电磁力,  $\bar{F}_{zaf}$  则取决于各极附加宽度,即  $(W/2, (W/2 + \Delta W))$  之间的等效边缘效应所产生的电磁力。

应用四角几何方法,这个附加宽度  $\Delta W$  可用下式计算<sup>[2]</sup>。

$$\pi \cdot \Delta W = \delta + \beta \cdot \tan^{-1}(\delta/\beta) \quad (4)$$

式中,  $\beta$  ——上下宽度差,  $\delta$  ——气隙长度,综合 (1)、(3)、(4) 式得每极净升力为:

$$\bar{F}_z = \frac{1}{2\mu_0} \left[ \bar{B}_{i\mu,lf}^2 \frac{W}{2} + \bar{B}_{i\mu,lf}^2 \Delta W_l \right] l_m + \frac{1}{2\mu_0} \left[ \bar{B}_{r\mu,rf}^2 \frac{W}{2} + \bar{B}_{r\mu,rf}^2 \Delta W_r \right] l_m \quad (5)$$

式中,  $\bar{B}_{i\mu}, \bar{B}_{r\mu}$  ——磁极左、右边的均匀磁密,  $\bar{B}_{lf}, \bar{B}_{rf}$  ——磁极左、右的边缘磁密,  $l_m$  ——电磁铁长度。通过附加宽度这一等效之后,可假定轨道与电磁铁之间的磁密是均匀的,即  $\bar{B} = \bar{B}_{a\mu} = \bar{B}_{af}$ ,  $\alpha = l$  或  $r$ ,代入式 (5) 经简化得:

$$\bar{F}_z = \bar{F} \frac{W'}{W} \left[ 1 + \frac{2\delta}{\pi W'} + \frac{\beta_l}{\pi W'} \tan^{-1} \left( \frac{\delta}{\beta_l} \right) + \frac{\beta_r}{\pi W'} \tan^{-1} \left( \frac{\delta}{\beta_r} \right) \right] \quad (6)$$

式中,  $\bar{F}$  为每极理想升力,且  $\bar{F} = \frac{B^2}{2\mu_0} W l_m$ 。

当上极宽于下极时(如图 3 示),则  $W' = W$ ,而当上下极宽相等,但有相对位移  $\Delta$  时,则  $W' = W - \Delta$ 。

同理可知半个极的侧向力计算式为:

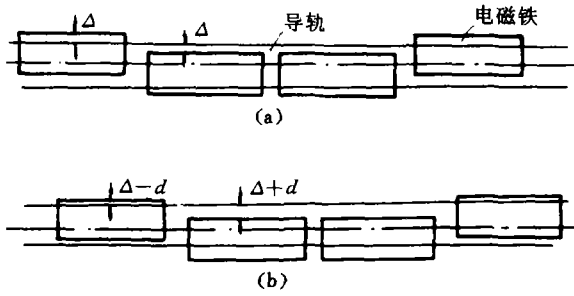


图 1 HSST 系列悬浮电磁铁结构

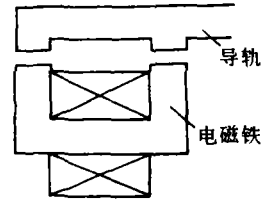


图 2 “U”型电磁铁与倒“U”型轨道结构

$$\bar{F}_{y\alpha} = \frac{\bar{B}^2}{2\mu_0} \left[ \frac{\delta}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{\beta_\alpha}{\delta} \right) \right] l_m, \quad \alpha = l \text{ 或 } r \quad (7)$$

$$\text{代入式(1)得侧向力 } \bar{F}_y = \bar{F} \left( \frac{\delta}{\pi W} \right) \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\beta_l}{\delta} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{\beta_r}{\delta} \right) \right] \quad (8)$$

式(6)和式(8)分别表示一个极的垂直升力和侧向导引力计算公式,对于完整的电磁铁来说它应有两个极,因此,每个电磁铁的理想升力为:

$$\bar{F}_0 = 2\bar{F} = \frac{\bar{B}^2}{\mu_0} W l_m$$

基于上述原理,对于图 1(b)的极宽与轨宽相等,互相之间交错排列,相互错开  $2\Delta$  的电磁铁系统,且整个系统偏离了轨道中心线距离  $d$ ,应用式(6)和式(8),可得出此支承——导向电磁铁系统的垂直升和侧向导引力为:

$$\bar{F}_z = 4\bar{F}_0 \left[ \left( 1 - \frac{\Delta}{W} \right) + \frac{2\delta}{\pi W} + \frac{\Delta - d}{\pi W} \tan^{-1} \left( \frac{\delta}{\Delta - d} \right) + \frac{\Delta + d}{\pi W} \times \tan^{-1} \left( \frac{\delta}{\Delta + d} \right) \right] \quad (9)$$

$$\bar{F}_y = 4\bar{F}_0 \frac{\delta}{\pi W} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{\Delta - d}{\delta} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{\Delta + d}{\delta} \right) \right] \quad (10)$$

## 2.2 激磁绕组窗口尺寸计算

已知电磁铁的极宽、极长、气隙磁密等参数后,激磁绕组的安匝数可通过磁路计算获取,窗口尺寸则应进行优化设计,以获得最佳的窗口尺寸和最轻的铁芯重量。在绕组的安匝数,导线的填充系数及电流密度已确定时,窗口面积可用以下公式计算:

$$S_w = \frac{IN}{KJ} \quad (11)$$

式中,  $I$ ——电流强度,  $N$ ——绕组匝数,  $K$ ——填充系数,  $J$ ——电流密度。

当设计电磁铁窗口内侧高  $h = \sqrt{S_w/2}$  时,则铁芯最轻。

## 3 主要设计参数选取

### 3.1 气隙磁密 $B_g$

电磁铁设计的第一步就是要根据所需的额定升力,正确选取气隙磁密,来求取磁极面积。对于比较典型的电磁材料,如低碳钢,其铁芯饱和磁密为  $1.5 \sim 1.8\text{T}$ 。由于漏磁影响,就使得气隙磁密只能设计为  $1.0\text{T}$  左右。如果考虑使磁铁工作在材料特性曲线 ( $B-H$  曲线) 的线性段,且允许有 50% 的过载裕度,那么,气隙磁密只能取  $0.5 \sim 0.65\text{T}$ 。

### 3.2 电磁铁长度 $l_m$

当电磁铁长度  $l_m$  与宽度  $W$  之比愈大时,则涡流效应影响愈小,磁铁升力愈大<sup>[2]</sup>,但轨道和电磁铁太长会使得安装,固定和加工等十分困难,因此,一般均采用多个电磁铁

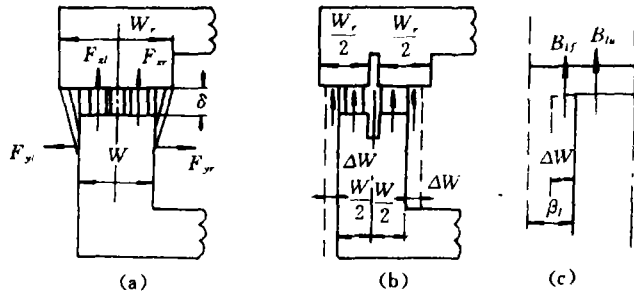


图3 电磁铁各气隙磁场与电磁分解

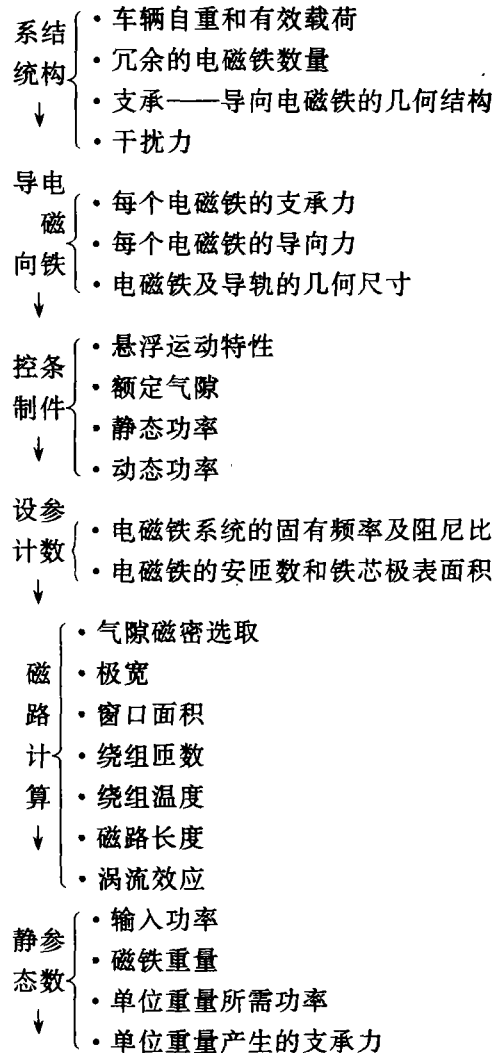
组合结构，如图 1 所示，每个电磁铁长为 1 米左右。

### 3.3 气隙长度 $\delta$

气隙大小的选取，将直接影响电磁铁的重量、造价及轨道造价。由于升力与气隙大小的平方成反比，因此，气隙应愈小愈好，但考虑加工误差及安全因素，气隙长度  $\delta$  取 10 毫米左右。日本目前已做到了取 7 毫米，这样大大地减少了机车自重。

## 4 电磁铁主要设计步骤

由于磁悬浮列车上安装了大量的悬浮电磁铁，因此在设计时，要考虑诸多的综合因素，其设计步骤可归结如下：



- 动态参数
- 力—气隙—电流特性
  - 动态仿真
  - 反馈增益和补偿

第一次流程设计完毕，经试验与仿真，如有必要进行参数修改，则退至“设计参数”这一步，继续向下进行，直至认为满足设计要求为止。

## 5 750kg 悬浮电磁铁设计结果

应用上述设计公式和步骤，作者设计了一个自重 263kg（包括梁重 100kg）的悬浮电磁铁实验装置，要求电磁铁承载 750kg。如图 4 所示，其中电磁铁长  $l_m = 940\text{mm}$ ，宽  $W = 25\text{mm}$ ，气隙长度  $\delta = 10\text{mm}$ ，绕组匝数  $N = 400$ ，窗口尺寸为  $70 \times 160\text{mm}$ 。图 5 (a) 为气隙大小不变时，电磁吸力随电流变化的理论计算与实验测试曲线，图 5 (b) 所示则为电流大小不变时，电磁吸力随气隙大小变化的理论计算与实验测试曲线。从图 5 可看出，悬浮电磁铁特性的理论计算与实验测试曲线相当吻合，其误差极小。表 1 中列出了该电磁铁的主要参数。

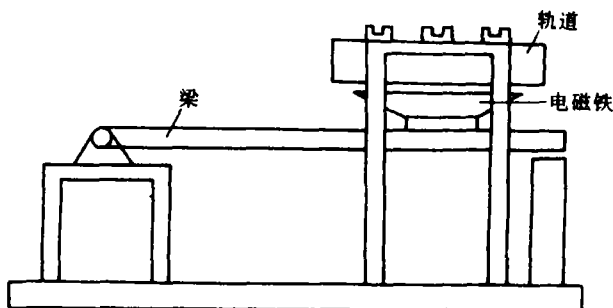


图 4 750kg 悬浮电磁铁实验装置

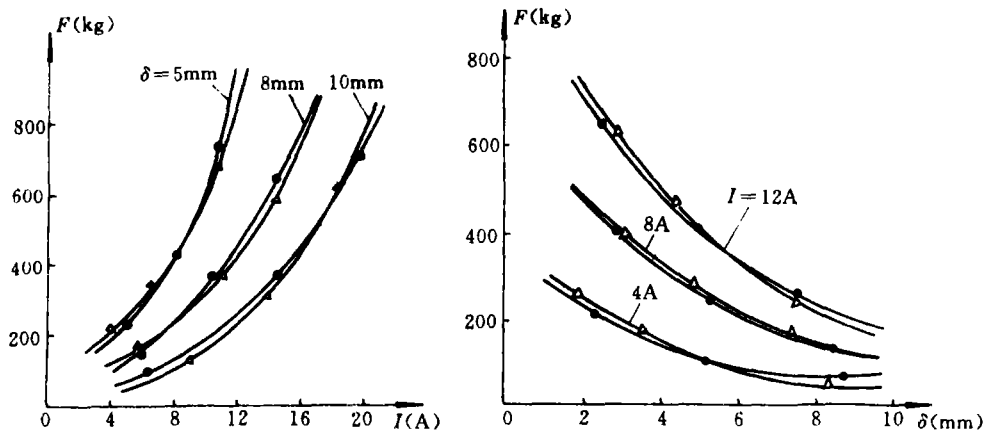


图 5 750kg 悬浮电磁铁特性曲线

## 6 结论

准确而合理地选择和计算电磁铁的设计参数是整个机车悬浮系统的关键。在进行电磁铁设计时, 首先应合理地选取一种电磁铁——导轨结构, 然后通过计算, 准确而又迅速地反映它的功耗、磁铁重量、功率与重量比。本文所叙述的设计计算方法比起其它一些方法(如数值求解和试验测试法)要方便和快速得多, 它的计算精度足够满足工程要求。

表 1 电磁铁主要参数

额定电流 (A)	22
额定电压 (V)	200
静态功率 (W)	340
绕组电阻 ( $\Omega$ )	0.7
绕组电感 (mH)	0.25

## 参 考 文 献

- 1 S Suzuki. HSST-03 System, IEEE Trans on Mag., 1984, 20 (5), 1675~1677
- 2 P K Sinha. Electromagnetic Suspension Dynamics and Control. Petet peregrinus Ltd, London, 1987, 12~165
- 3 W Brezina, J Langerholc. Lift and side forces on rectangular pole pieces in two dimensions. J. Appl. Phys. 1974, (45), 1969~1972
- 4 T Koseki, E Masada. Lateral motion of a Short-stator Type Magnetic Wheel with Electromagnetic Suspension System, 10th International Conference on Maglev, 1988, 101~110

## Study for Designing the Electromagnets of the Maglev Train

Chen Guirong Chang Wensen Yin Liming

(Department of Automatic Control)

### Abstract

The electromagnetic construction of the HSST-03 Maglev train in Japan is simply introduced, the fundamental theories and the analysis method are used in this paper. The detailed derivation for the main formations of designing the electromagnets has been carried out (such as the calculation of the static magnetic forces and the sizes of the excited coils, etc). The analysis for selecting the main parameters (airgap flux density, electromagnetic length, airgap's length, etc) is also carried out. Based on all this, the method and steps for designing the electromagnets of the Maglev train are given. Besides, the curves of the calculation and testing for the 750 kg electromagnets which have been designed with the designing method and steps are given in it.

**Key words** maglev train, magnetic field, electromagnetic design