

研
究
开
发EMS 磁悬浮列车的零电流型永磁电磁
混合磁铁设计技术研究

李云钢, 张 晓, 程 虎, 刘恒坤

(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: 李云钢 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事磁悬浮技术研究。

摘 要: 针对 EMS 磁悬浮列车的零电流型永磁电磁混合磁铁, 研究其永磁体和电磁线圈结构参数的设计方法。永磁体安装在磁轭部位, 其截面积不受磁极面积的限制, 研究得出永磁体的厚度与其截面积的约束关系, 并给出永磁重量最小化的设计方法。根据最大平衡安匝数要求, 研究得出相对于纯电磁铁, 混合磁铁的电磁线圈匝数可减半。由于混合磁铁的可控性能低于纯电磁铁, 基于可控性要求, 给出修正永磁体的结构参数的方法。最后给出一个实例, 将 1 t 负载悬浮在 8 mm 间隙内, 所需永磁体仅为 6.4 kg。

关键词: 磁悬浮; 永磁体; 永磁电磁混合磁铁; 可控性

中图分类号: U292.91+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)05-0030-03

Design of Zero-Power Hybrid Magnet with Permanent Magnets
and Electromagnets in EMS Maglev Vehicles

LI Yun-gang, ZHANG Xiao, CHENG Hu, LIU Heng-kun

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

Abstract: To design the zero-power hybrid magnet with permanent magnets and electromagnets for EMS maglev vehicles, the structural parameters of its permanent magnets and electromagnets were researched on. The permanent magnet was located at the middle of the yoke, which made its sectional area independent from the area of the pole. The restriction between the thickness and the area of the permanent magnet was presented, and the method of designing the permanent magnet with minimum mass was given. According to the requirements of the maximum balance ampere-turn, it was concluded that the ampere-turn of the hybrid magnet can be reduced to half of that of the pure electromagnet. It was shown that the controllability of the hybrid magnet is always weaker than that of the pure electromagnet, and then a revision of the design for the permanent magnet was proposed based on the requirement of the controllability. Finally, a design example of the hybrid magnet was presented with 1 t load suspending at 8 mm, and the mass of the permanent magnet was only 6.4 kg.

Key words: maglev; permanent magnet; hybrid magnet with permanent magnet and electromagnet; controllability

0 引言

当前用于商业运营的磁悬浮列车, 有中国上海的 TR08 高速和日本东部丘陵的 HSST 低速磁悬浮列车, 它们都属于 EMS 型磁悬浮列车。EMS 型磁悬浮列车采用电磁铁来承载车重, 由此会产生额外的悬浮能耗。例如, TR08 每辆车长 25 m, 总重 65 t, 其悬浮能耗, 100 km/h 运行时约为 70 kW, 400 km/h 运行时约为 100 kW^[1]; HSST 的悬浮能耗, 静态为 700 W/t, 100 km/h 运行时为 900 W/t^[2]。如何减小悬浮能耗是近年的研究热点, 可以采用超导线圈来代替电磁线圈^[3], 或在电磁铁

中加入超导磁体^[4]或永磁体^[5-14]等。针对永磁电磁混合悬浮技术, 文献^[11]研究了将永磁体加在磁极表面的情况, 此时永磁体截面与磁极截面相等, 为达到节能目的, 所需永磁体的最小矫顽力约为 500 kA/m; 如果将永磁体安装在磁轭部位, 永磁体截面可大于磁极截面^[14], 对永磁体的矫顽力要求还可降低。目前钕铁硼永磁体的矫顽力一般可达 800~1 000 kA/m, 用它可提供磁悬浮列车所需的全部悬浮力, 电磁线圈仅提供稳定调节作用, 其平均电流为零。本文称这种最节能的磁铁为零电流型混合磁铁, 并从基本模型出发, 通过理论分析, 得出其永磁体和电磁线圈的结构参数的选择方法, 最后给出一个设计实例。

收稿日期: 2011-01-25

1 零电流型混合磁铁中的永磁体的结构参数初步设计研究

不失一般性, 考虑将图1所示的纯电磁铁改造为图2所示的永磁电磁混合型磁铁, 改造前后, 磁极面积 S 不变。纯电磁铁的吸力 F_{mc} 和混合磁铁的吸力 F_{mh} 分别为^[13]

$$F_{mc} = \mu_0 S \left(\frac{(NI)_c}{2\delta} \right)^2 \quad (1)$$

$$F_{mh} = \mu_0 S \left(\frac{(NI)_h + H_c \cdot \delta_m}{2\delta + \frac{S \cdot \delta_m}{S_m \cdot \mu_r}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; δ 为悬浮间隙; $(NI)_c$ 为纯电磁铁的线圈安匝数; $(NI)_h$ 为混合磁铁的线圈安匝数; μ_r 为永磁材料磁导率; H_c 为永磁体矫顽力; S_m 为永磁体截面积; δ_m 为永磁体厚度。

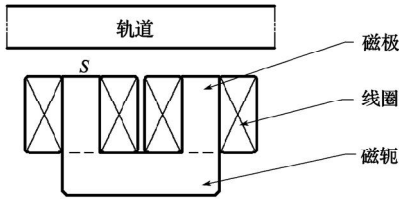


图1 纯电磁铁结构

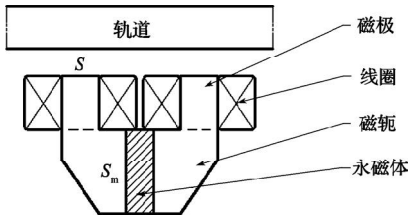


图2 永磁电磁混合型磁铁结构

一般 $\mu_r \approx 1$, 为了方便, 以后不再列出。并选取记号:

$$k_s = S_m / S \quad (3)$$

设额定间隙为 δ_0 , 承载质量为 M , 重力加速度为 g , 纯电磁铁和混合磁铁的额定线圈安匝数分别为 $(NI)_{c0}$ 和 $(NI)_{h0}$, 代入式(1)、式(2), 并根据零电流型混合磁铁的定义, 有

$$(NI)_{c0} = 2\delta_0 \cdot \sqrt{M \cdot g / (\mu_0 S)} \quad (4)$$

$$(NI)_{h0} = 0 \quad (5)$$

在额定间隙和额定电流下, 这2种磁铁提供的力都等于承载重量, 于是得到

$$\mu_0 S \left(\frac{(NI)_{c0}}{2\delta_0} \right)^2 = \mu_0 S \left(\frac{(NI)_{h0} + H_c \cdot \delta_m}{2\delta_0 + \delta_m / k_s} \right)^2$$

变换可得:

$$\delta_m = \frac{2(NI)_{c0} \cdot \delta_0}{2H_c \cdot \delta_0 - (NI)_{c0} / k_s} \quad (6)$$

式(6)表明, δ_m 和 S_m 不是独立的, 永磁体的厚度一旦选定, 截面积也就随之而定。

如果期望用最小体积(或者重量)的永磁体来实现该设计, 可选取目标函数 J 为

$$J = \delta_m \cdot k_s \quad (7)$$

使得 J 取极小的解, 就是所求的最优解。结合式(6)可求得最优解为

$$\delta_m|_{\text{opt}} = \frac{2(NI)_{c0}}{H_c}, k_s|_{\text{opt}} = \frac{(NI)_{c0}}{H_c \cdot \delta_0} \quad (8)$$

2 零电流型混合磁铁中的电磁线圈参数设计研究

如前所述, 零电流型混合磁铁提供额定承载所需的安匝数, 在额定间隙下正好为零, 而在其他间隙下则并不为零, 本文将之定义为平衡安匝数, 它是 δ 的函数。根据式(1)和式(2), 可求得纯电磁铁和混合磁铁的平衡安匝数分别为

$$(NI)_c|_{\text{bal}}(\delta) = \frac{\delta}{\delta_0} \cdot (NI)_{c0} \quad (9)$$

$$(NI)_h|_{\text{bal}}(\delta) = \left(\frac{\delta}{\delta_0} + \frac{\delta_m}{2k_s \cdot \delta_0} \right) \cdot (NI)_{c0} - H_c \cdot \delta_m \quad (10)$$

通常假设吸死间隙为0, 降落间隙为 $2\delta_0$, 即 $\delta \in [0, 2\delta_0]$ 。根据式(10), 注意到 $\forall x \in [0, \delta_0]$:

$$(NI)_h|_{\text{bal}}(\delta_0 + x) + (NI)_h|_{\text{bal}}(\delta_0 - x) = 0$$

于是有

$$(NI)_h|_{\text{bal}}(\delta_0 - x) = -(NI)_h|_{\text{bal}}(\delta_0 + x) \quad (11)$$

式(11)表明, 当系统围绕额定间隙上下波动同样幅度时, 所需平衡安匝数大小相等方向相反。当前, 悬浮控制器的功率放大器都是全桥斩波电路, 只需改变控制极性就可使输出电流反向, 电磁线圈需要反向电流不会给控制器造成额外负担。根据式(11), 如果某控制器能使车体从 $2\delta_0$ 处起浮, 那么它也能保证在零间隙下提供足够的反向力, 因此在研究混合磁铁的安匝数要求时, 反向防吸死问题不需专门研究, 只需研究 $\delta \in [\delta_0, 2\delta_0]$ 的情况。

当 $\delta \in [\delta_0, 2\delta_0]$ 时, $(NI)_h|_{\text{bal}}(\delta) \geq 0$, 此时, 式(10)可变换为:

$$(NI)_h|_{\text{bal}}(\delta) = (NI)_c|_{\text{bal}}(\delta) - (NI)_{c0} \quad (12)$$

当 $\delta = 2\delta_0$, 纯电磁铁和混合磁铁的平衡安匝数都取到最大值, 且有:

$$(NI)_h|_{\text{bal}}(2\delta_0) = \frac{1}{2} \cdot (NI)_c|_{\text{bal}}(2\delta_0) \quad (13)$$

悬浮磁铁必须要提供“最大平衡安匝数”所给出的安匝数需求, 才能实现车体起浮, 因此最大平衡安匝数是悬浮磁铁的“装机容量”要求。式(13)表明, 混合磁铁的最大平衡安匝数是纯电磁铁的一半, 因此

如果选用同样的电流,混合磁铁的线圈匝数可减半。

3 基于可控性能要求对永磁体结构参数进行改进

EMS 型磁悬浮系统是开环不稳定系统^[9],根据控制理论,它具有可控性是其闭环可稳定的必要条件^[15]。分析表明,磁浮系统的可控性条件,可等价电磁力能随电流的变化而变化。根据式(1)和式(2)可知,纯电磁铁系统和混合磁铁系统都是可控的。为了对可控性进行定量分析,分别定义纯电磁铁系统和混合磁铁系统的可控性能函数如下:

$$Q_c(\delta) = \frac{\partial F_{mc}}{\partial (NI)_c} \Big|_{F_{mc}=Mg} = \frac{\mu_0 S \cdot (NI)_c \Big|_{bal}(\delta)}{2\delta^2} \quad (14)$$

$$Q_h(\delta) = \frac{\partial F_{mh}}{\partial (NI)_h} \Big|_{F_{mh}=Mg} = 2\mu_0 S \frac{(NI)_h \Big|_{bal}(\delta) + H_c \cdot \delta_m}{(2\delta + \delta_m/k_s)^2} \quad (15)$$

可控性能函数的值越大,则可控性越好。不合理的设计可能导致该值很小,以致功率放大器不能提供足够的电流变化率和变化范围来满足其要求,那么实际也是不可稳的。

将式(9)和式(10)分别代入式(14)和式(15),可得:

$$Q_c(\delta) = \frac{\mu_0 S \cdot (NI)_{c0}}{2\delta_0 \cdot \delta} \quad (16)$$

$$Q_h(\delta) = \frac{\mu_0 S \cdot (NI)_{c0}}{2\delta_0 \cdot \delta + \delta_0 \delta_m / k_s} \quad (17)$$

由于 $\mu_0 S \cdot (NI)_{c0}$ 、 $2\delta_0 \cdot \delta$ 、 $\delta_0 \delta_m / k_s$ 都是正数,可见 $Q_c(\delta)$ 和 $Q_h(\delta)$ 都是 δ 的减函数,而且有

$$Q_h(\delta) < Q_c(\delta) \quad (18)$$

式(18)表明,在当前意义下,混合磁铁的可控性能始终要低于纯电磁铁,不能设计出与纯电磁铁具有相同可控性能的混合磁铁。悬浮磁铁的可控性能降低之后,必须提升悬浮控制器的控制性能,才能使得总的悬浮性能不致降低,因此,混合磁铁的悬浮控制难度较纯电磁铁为大。

混合磁铁的可控性能方面的要求,对永磁体的结构参数选取构成约束。假设在额定间隙点,混合磁铁的可控性能要达到纯电磁铁的 λ 倍, $0 < \lambda < 1$,即要求:

$$Q_h(\delta_0) = \lambda \cdot Q_c(\delta_0) \quad (19)$$

将式(16)、式(17)代入式(19),可得

$$\delta_m = \frac{2(1-\lambda)}{\lambda} \cdot \delta_0 \cdot k_s \quad (20)$$

联合式(20)和式(6)求解,可得

$$\delta_m \Big|_{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{(NI)_{c0}}{H_c} \cdot k_s \Big|_{\lambda} = \frac{1}{2(1-\lambda)} \cdot \frac{(NI)_{c0}}{H_c \cdot \delta_0} \quad (21)$$

称此解为 λ -可控解。与式(8)对比可知,重量最优解相当于 $\lambda=0.5$ 的 λ -可控解,即它的可控性能只有纯电磁铁的一半,其控制难度会很大。实际 λ 可在0.7~0.8之

间取值。

4 结论及设计实例

本文研究EMS磁悬浮列车的零电流型永磁电磁混合磁铁的设计问题,重点分析永磁体和电磁线圈结构参数的设计方法。首先以永磁体的质量最小为设计目标,推导得到永磁体的厚度与其截面积的约束关系;然后通过分析防吸死和最大间隙下的起浮能力要求,得出混合磁铁的电磁线圈匝数为纯电磁铁的一半;最后研究了永磁体的引入对系统可控性能的影响,通过调整可控系数,可在体积质量与可控性之间进行折衷。下面给出一个设计实例。

设悬浮质量 $M=1\ 000\text{ kg}$,额定间隙 $\delta_0=8\text{ mm}$;永磁体矫顽力 $H_c=850\text{ kA/m}$ 。

根据经验,选取气隙磁密 $B=0.8\text{ T}$,可计算出磁极面积 $S=0.019\ 24\text{ m}^2$ 。

以上参数代入式(4),可计算出 $(NI)_{c0}=10.186\text{ kA}$ 。

选取 $\lambda=0.7$,代入式(21),可计算出 $\delta_m=0.017\text{ m}$, $k_s=2.50$ 。

代入式(3),可计算出永磁体截面积 $S_m=0.048\text{ m}^2$ 。

永磁体密度约为 7.8 g/cm^3 ,因此本设计所需永磁体质量约为 6.4 kg 。

选定气隙磁密后,在不考虑铁磁材料磁阻的条件

下,可计算出纯电磁铁的绕线窗口面积为 $S_w = \frac{2\delta \cdot B}{\mu_0 \cdot J \cdot \eta}$,

其中, J 为导线电流密度, η 为线圈填充系数。考虑起浮工况, $\delta=2\delta_0=16\text{ mm}$,起浮过程较短,可选用较大电流密度,对于铝导线,选 $J=2.5\text{ A/mm}^2$, $\eta=0.7$,于是可计算出 $S_w=0.011\ 6\text{ m}^2$ 。混合磁铁的绕线窗口面积是纯电磁铁的一半,因此其窗口面积为 $0.005\ 8\text{ m}^2$ 。

参考文献:

- [1] 吴祥明. 磁浮列车 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- [2] Yoshihide Yasuda, Masaaki Fujino, Masao Tanaka, Syunzo Ishimoto. The First HSST Maglev Commercial Train in Japan [C]. Shanghai: The 18th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 2004: 76-85.
- [3] Huawei Xing, Chen Gu, Tong Zhou, Zhenghe Han, Menglin Liu, Shuli Liu. An Experimental Study on the Controllability of HTS Coils in MAGLEV System [C]. Shanghai: The 18th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 2004: 348-355.
- [4] Wang L, Chen G H, Liao C X, Zhang J, Lian J S. A Research of Suspension System with Hybrid Electromagnets Made of HTS Coils and Normal Conductor Coils [C] // Proceedings of the 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA2006). Singapore: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006.
- [5] Mimpei Morishita, Teruo Azukizawa, Shuji Kanda, Noburu Tamura, Toyohiko Yokoyama. A New maglev system for magnetically Levitated Carrier system [J]. IEEE Transactions

(下转第43页)

的优越条件,它能够依托企业的技术平台为车辆的技术改造、性能升级、节能降耗提供保障;能够依托强大的生产制造、稳定的供货平台为车辆源源不断地提供优质配件;能够依托庞大的人才队伍确保车辆的高性能和品质,实现地铁车辆买卖双方共赢、共荣的目的;并为地铁车辆买卖双方形成战略同盟,开拓产品新市场提供强有力的支撑。

北京地铁4号线维保服务项目取得成果如下:

①为运营管理部门培养了大量专业技术、管理人才;

②实现了运营管理部门和车辆制造企业车辆运营服务安全,达到了车辆购置维保合同的可靠性目标要求;

③实现了运营管理部门和车辆制造企业降低运营、维保成本;

④实现了车辆运营服务的正点率、兑现率;

⑤提高了运营管理部门和车辆制造企业车辆运营服务的管理水平;

⑥为车辆制造企业地铁延伸服务模式积累了宝贵经验。

6 总结

地铁车辆制造企业进入地铁维保服务业务行列,将以无法替代的资金、技术、管理优势,为地方政府、经营管理公司带来优质服务和财富,同时也成为制造企业新的经济增长点。制造企业的地铁延伸服务模式是增加地铁维保市场多元化发展的又一有生力量,对新兴地铁市场的意义尤为重要,相信在不久的将来会有更多的专业企业进驻地铁的维保服务行列,实现地铁车辆售前、售中、售后的全寿命服务模式。

参考文献:

- [1] 冷庆君.城市轨道交通车辆检修模式及建议[J].机车电传动,2011(9)
- [2] 吴强.地铁车辆检修制改进的探讨[J].现代城市轨道交通,2007(2).
- [3] 陈文芳.地铁车辆检修制度改革之我见[J].现代城市轨道交通,2007(1).
- [4] 温清.关于地铁车辆检修制度[J].城市轨道交通研究,2004(4).

(上接第32页)

on Vehicular Technology, 1989, 38(4): 230-236.

- [6] The M3 Team. The M3 Urban Transportation System[R]. USA: MagneMotion Inc., 2003: 7-8.
- [7] Richard Thornton, Tracy Clark, Ken Stevens. The Magne-Motion Maglev System M3 [C]. USA: TRB Annual Meeting, 2003: 7-8.
- [8] Xu Zhengguo, Jin Nengqiang, Shi Liming, Xu Shaohui. Maglev System with Hybrid-excited Magnets and an Air-gap Length Control [C]. Shanghai: The 18th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 1019-1023.
- [9] Xu Shaohui, Xu Zhengguo, Jin Nengqiang, Shi Liming. Levitation Control Scheme for the Hybrid Maglev System without Acceleration Sensor [C]. Shanghai: The 18th International Conference on

Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 1024-1029.

- [10] 徐正国. 电磁永磁混合悬浮磁悬浮模型车控制方案的研究[D].北京:中国科学院电工研究所,2005.
- [11] 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): 94-98.
- [12] 杨祚唐,陈慧星,李云钢.电磁永磁混合悬浮的零功率控制[J].兵工自动化,2007,26(3): 59-61.
- [13] 张颖,陈慧星,吴志添,李云钢.电磁永磁混合磁悬浮列车的磁铁结构优化设计[J].机车电传动,2008(5): 30-32.
- [14] 李云钢,等.一种电磁型磁浮列车的永磁电磁混合磁铁设计方法:中国,ZL 2007 1 0192657.2 [P]. 2009.
- [15] M. Gopal. Modern Control System Theory [M]. India: Wiley Eastern Limited, 1984.

动态消息

国产交流传动内燃机车首次出口发达国家

2011年7月22日,中国南车旗下的资阳机车有限公司首台出口澳大利亚机车下线。这是我国具有自主知识产权、采用交流传动技术的内燃机车首次出口发达国家,标志着我国有能力自主研制具有世界先进水平的交流传动内燃机车。

澳大利亚对机车要求极高,它以代表世界水平的欧美机车技术作为机车验收标准。对此,中国南车资阳公司高度重视,专门针对这一高端市场为澳方量身定制了全套解决方案和严格的质保体系。该型机车采用的交流传动技术被认为是现代机车的标志和发展方向。与此同时,机车还具有“两高一

低”的特点,即,高牵引性能(粘着系数达0.38~0.39)、高环保要求(排放指标满足欧盟Satge IIIA标准)、低燃油消耗,充分体现了绿色低碳理念。

据介绍,出口澳大利亚机车代表了该公司近10年来立足交流传动内燃机车系统集成技术研发的最新成果。在此国产化交流传动内燃机车技术平台上,可以衍生出1 000~6 000马力的不同功率等级、不同轨距的交流传动内燃机车,这将为我国进一步开拓国际交流传动内燃机车市场打下良好基础。

首批6台澳车预计于今年12月底全部交付完毕。鉴于中国南车资阳公司领先的设计理念和可靠的设计方案,澳大利亚客户在首批机车尚未接收和投入运用的情况下,于今年3月份追加了4台机车订单。

(朱一迪)