

研
究
开
发永磁电磁混合磁悬浮列车
吸死防护技术研究

龙鑫林, 余龙华

(国防科学技术大学 磁悬浮技术工程研究中心, 湖南 长沙 410073)



作者简介: 龙鑫林 (1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为磁悬浮控制技术。

摘 要: 相对传统的电磁型磁悬浮 (EMS) 列车, 永磁电磁混合型磁悬浮 (PEMS) 列车可以降低功耗、减少发热, 还可以实现大气隙悬浮, 但存在吸死的可能是目前阻碍其向工程应用发展的最大障碍, 提出一种新型永磁电磁混合磁铁结构, 使得系统具备冗余性, 并通过理论和仿真分析新结构的合理性和有效性, 能很好地完成悬浮和吸死防护任务, 分析了相应的控制器改造的可行性。

关键词: 磁悬浮列车; 吸死; 永磁电磁混合型悬浮; 电磁型磁悬浮; 冗余

中图分类号: U292.91+7

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2011)02-0037-03

Research of Protection Against Suspension Contact in Hybrid Suspension System

LONG Xin-lin, SHE Long-hua

(Engineering Research Center of Maglev, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Compared with EMS, the PEMS reduced the suspension power loss on a large scale, released little quantity of heat, and caught realize larger air gap. It was more difficult to control the PEMS, especially the probability of suspension contact prevented it from practical application. In this paper, a new structure of magnet in PEMS was put forward, which made the system redundancy. The theory analysis and simulation showed its rationality and availability, and the new structure caught complete the assignment of suspension and protection against suspension contact well. At last this paper analyzed the workability of the controller.

Key words: maglev; suspension contact; PEMS; EMS; redundancy

0 引言

较之纯电磁EMS型磁悬浮列车, 永磁电磁混合型PEMS磁悬浮列车具有无可比拟的优势, 其可大幅度减少功耗、减少发热。另外PEMS磁悬浮列车还可以适当增大悬浮气隙, 降低了对轨道精度的要求, 但增加了控制难度。国内外学者和工程师对其进行了研究, 提出了较多的控制方法。PEMS磁悬浮列车的吸死防护问题更加突出, 原因在于当悬浮间隙较小时, 即使切断电源, 车体自重仍不足以克服永磁体和轨道之间的吸力, 吸死故障将破坏列车结构, 甚至引发重大交通事故。目前国内外对吸死防护研究的文献资料较少, 少数学者提出从控制算法上想办法, 预测吸死趋势然后防护, 实质上都是靠反向电流产生反向电磁场, 改变整个磁路的方向而达到减小磁体吸力。这些方法的前

提都要保证系统硬件自始至终正常工作, 而系统供电故障 (由于车上有蓄电池, 这里指单点系统故障)、电磁线圈故障、控制器故障都是有可能发生的, 虽然几率很小, 但一旦发生, 后果不堪设想。本文提出将现有的单点系统稍作改造, 包括电磁铁改造、供电系统和控制器改造, 使系统具有冗余性, 最大限度降低吸死的可能性。

1 电磁铁设计

由于所设计的悬浮磁铁在结构上要求完全兼容现有的低速磁悬浮列车和轨道, 并且原有结构是根据悬浮刚度与悬浮功耗等性能优化设计出来的, 本文首先分析现有的结构模型, 通过Ansoft Maxwell有限元仿真计算现有结构模型的电磁力特性, 然后通过试验验证现有结构的可行性, 再在此基础上提出新结构并对其进行电磁力特性分析。与现有结构相比, 新结构除了增加了系统的冗余性外, 还保持原有的结构的电磁力特性。

收稿日期: 2010-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60974128)

原结构如图1所示, $\delta(t)$ 为悬浮间隙, δ_p 为永磁体厚度, S_δ 为悬浮极面积, $u(t)$ 为线圈两端的控制电压, $i(t)$ 为线圈电流。

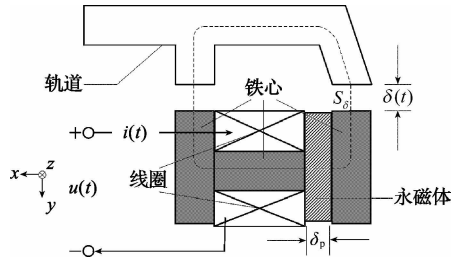


图1 原永磁电磁混合型单点系统

初始间隙 δ 为20 mm, 通过Ansoft Maxwell有限元仿真计算, 当线圈电流为65 A时, 总共产生的对轨道的吸力为46 976 N, 也就是说, 当其承受的负载为4.7 t时, 所需起浮电流约为65 A。图2为其电磁力特性, 可以看到其磁力线基本闭合, 漏磁很少。负载不变, 要实现“零功率悬浮”, 即吸力全部由永磁体提供, 线圈电磁力只作动态调节控制用, 稳态时维持在零值附近。经有限元仿真计算出此时悬浮间隙大约为9 mm。如图3所示, 理论分析与试验结果相符合。

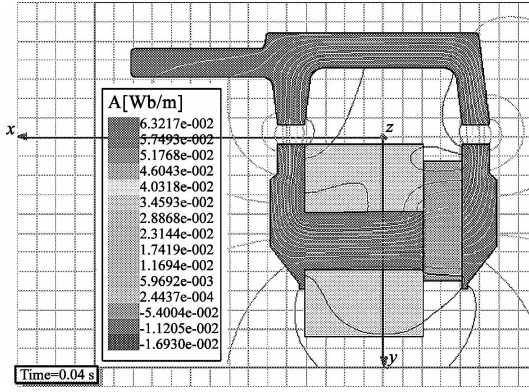


图2 原系统磁力线

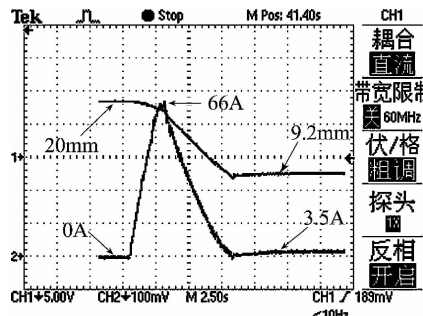


图3 现有单点系统起浮与稳定悬浮

可以看出原系统能很好地完成悬浮任务, 但一旦控制器或电源发生故障, 间隙又小于9 mm时, 将会发生吸死的危险, 因此本文在现有的基础上对磁铁进行改造。如图4所示, 将线圈改成两部分, 分别由2个控制器来控制, 并由2个不同电网来分别供电, 一旦一套控制器或电源系统出故障了, 另一套系统仍然正常工作, 这样使得系统具有冗余性而不发生吸死的危险, 而且

改造后的新结构电磁力特性基本与原系统保持一致。

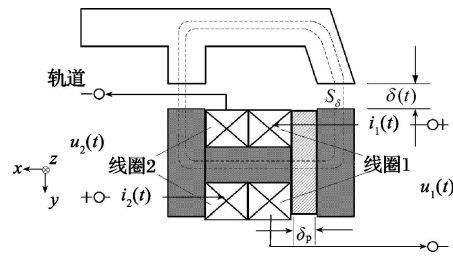


图4 新结构永磁电磁混合系统

如图5和表1所示, 新结构电磁力特性仍和现有结构保持一致, 但增加了冗余性。虽然新磁铁结构改变了绕组方式, 并不增加多少成本, 新结构起浮电流 $i_1(t)$ 与 $i_2(t)$ 都为65.3 A。

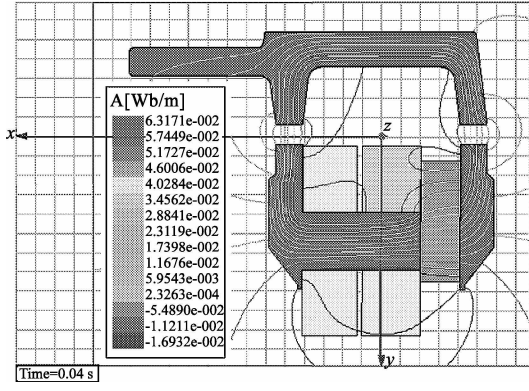


图5 新结构磁力线

表1 新旧结构起浮电流表

	起浮电流/A	零功率悬浮间隙/mm	冗余性
原结构	65.0	9.0	无
新结构	65.3	9.1	有

2 供电系统和控制器改造

前面已提到, 为了使系统具有冗余性, 供电系统和控制器都必须具有冗余性。列车上有多个电网系统, 图4中 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 可以分别来自不同的2个电网, 这对已有的硬件条件来说容易实现, 并且不增加成本, 唯一使得新系统变得较复杂的环节是控制系统的设计与改造。由于一个点由输出控制电压 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 共同控制, 两者必须来自2个不同控制器, 比起原有系统每个控制器控制1个点要变得复杂了。

在此首先考虑其可行性, 单点系统由单输入单输出系统变为两输入单输出系统, 系统运动学和电压平衡方程如式(1)。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{\delta} &= Mg - F = Mg - \mu_0 S_\delta \left(\frac{N(i_1 + i_2)}{2\delta + P} + \frac{H_c \delta_p}{2\delta + Q} \right)^2 \\ u_1 &= Ri_1 + \frac{C_1(i_1 + i_2)}{(2\delta + P)} + \left(\frac{2C_2}{(2\delta + Q)^2} - \frac{2C_1(i_1 + i_2)}{(2\delta + P)^2} \right) \dot{\delta} \\ u_2 &= Ri_2 + \frac{C_1(i_1 + i_2)}{(2\delta + P)} + \left(\frac{2C_2}{(2\delta + Q)^2} - \frac{2C_1(i_1 + i_2)}{(2\delta + P)^2} \right) \dot{\delta} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中: C_1 、 C_2 、 P 、 Q 分别满足

$$C_1 = \frac{\mu_0 N^2 S_\delta}{\varepsilon_e} = 0.000\,926\,7,$$

$$C_2 = -\frac{\mu_0 N S_\delta H_c \delta_p}{\varepsilon_e} = -0.169\,7,$$

$$P = \delta_p S_\delta / (\varepsilon_e \mu_r S_p) = 0.033\,04,$$

$$Q = \delta_p S_\delta / (\varepsilon_p \mu_r S_p) = 0.036\,83,$$

$R=1\Omega$ 为线圈电阻, 上标“ $\cdot$ ”表示变量对时间 t 的

导数。选取 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [\delta \ \dot{\delta} \ i_1 + i_2]^T$,

$u = [u_1 \ u_2]^T$, 在零功率悬浮工况下, 系统的平衡点为

$$x_0 = \begin{bmatrix} -\frac{C_2}{2\sqrt{\frac{C_1 Mg}{\varepsilon_e}}} - \frac{Q}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \text{而在平衡点处的线性数}$$

学模型为式(2):

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{4gL}{C_2} & 0 & \frac{2C_1 g}{T} \\ 0 & \frac{2TL}{C_1 C_2} & \frac{RT}{2C_1 L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{T}{2LC_1} & -\frac{T}{2LC_1} \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

变量 T 、 L 满足 $T = C_2 + (Q - P)\sqrt{C_1 Mg / \varepsilon_e} < 0$, $L = \sqrt{\frac{C_1 Mg}{\varepsilon_e}}$

$$P_c = [B \ AB \ A^2 B] \quad (3)$$

很容易判断式(3)满秩, 说明系统是可控的。采用

状态反馈控制, 仿真结果如图6~图8。另外, 仿真结果图表示系统起浮过程中, 5 s时刻突然其中一个控制器输出故障时, 系统仍正常工作, 不会发生吸死故障。

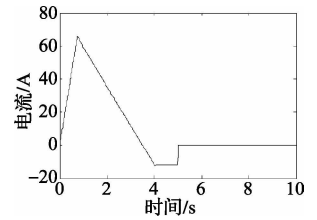


图6 控制器1 电流输出

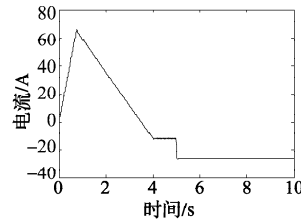


图7 控制器2 电流输出

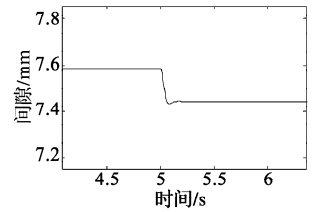


图8 间隙值

3 结语

经过对磁铁、电源、控制器简单更新改造后, 系统具有冗余性, 在硬件条件上最大限度降低了吸死的可能性。经分析, 新系统是可控、可实现的, 虽然增加了一定的控制复杂度和成本, 但这些相对于能扫除吸死障碍还是微不足道的。

参考文献:

- [1] 陈慧星. 永磁型EMS磁浮列车悬浮磁铁设计与控制问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- [2] 李云钢. EMS型磁浮列车悬浮控制技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 1997: 10-20.
- [3] 王莉, 连级三. 永磁和电磁构成的混合式悬浮系统研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(3).
- [4] 王莉, 张昆仑. 基于零功率控制策略的混合磁悬浮系统[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5).
- [5] 张颖, 陈慧星, 李云钢. 电磁永磁混合EMS型磁浮列车的吸死防护问题研究[J]. 兵工自动化, 2009, 28(1).

(上接第36页)

3 结论

理论和试验表明:

① 提高闸瓦材料的机械损失正切损耗角 $\tan\delta$ 可以有效防止闸瓦龟裂的产生。

② 基体材料(树脂)的分解残留物, 对金属镶嵌物的产生至关重要, 提高树脂的分解残留物比例可以防止或减少金属镶嵌物的产生。

③ 高莫氏硬度(莫氏硬度大于5)的填料的加入, 虽然可以增加闸瓦的摩擦系数, 但同时也增加了金属镶嵌物产生的可能。

④ 由于材料的机械损失正切损耗角 $\tan\delta$ 与材料的摩擦系数 μ 成正比, 高机械损失正切损耗角 $\tan\delta$ 的材料可以减少高莫氏硬度填料的应用, 因此也可以减少或避免金属镶嵌物的产生。

参考文献:

- [1] 李岳恒, 张启安. 对机车闸瓦开发的探讨[J]. 内燃机车, 2001(4): 24-27.
- [2] Gurunath P V, Bijwe J. Friction and wear studies on brake-pad materials based on newly developed resin[J]. Wear, 2007, 263: 1212-1219.
- [3] 马东辉, 张永振, 陈跃, 宫宝. 制动摩擦材料高速摩擦学性能的主要影响因素[J]. 润滑与密封, 2003(6): 44-47.