

基于不等宽结构的混合型悬浮装置的研究

金 森¹, 刘国清², 余思儒¹, 唐德义¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756;

2. 西南交通大学 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 针对中低速磁悬浮列车中永磁与电磁混合悬浮磁铁存在的吸死问题, 研究了一种基于不等宽结构的混合悬浮装置。分析该装置中 U 型铁、F 型轨及两者间气隙的电磁关系, 建立基于不等宽结构悬浮装置的模型。以株洲中低速磁浮商业试验线列车为基础, 使用 ANSOFT 软件进行仿真, 对该悬浮装置进行了设计及验证。仿真结果表明: 在改进的不等宽混合悬浮装置中, 无论气隙间距大小如何, 该不等宽结构中的悬浮力始终与重力保持平衡, 可实现列车悬浮的“0 功率”控制。

关键词: 中低速磁悬浮列车; 吸死问题; 混合型悬浮装置; 不等宽结构

中图分类号: U292.91⁺7

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.05.008

Hybrid Suspension System Based on the Unequal Width Structure

JIN Sen¹, LIU Guoqing², YU Siru¹, TANG Deyi¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 2. Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: A kind of hybrid suspension system with the electro and permanent magnets based on unequal width structure was studied to solve the problem of the suspension contact existed in medium-speed maglev trains. By analyzing the electromotive relationship of the U-shaped iron, F-shaped rail and air gap using ANSOFT, the model of a suspension system based on the unequal width structure was established. The suspension system was designed and verified on the basis of Zhuzhou maglev test line. Simulation results showed that regardless of the size of air gap in the new suspension system, the attraction force between the iron and rail always could balance the gravitational force, thereby making zero power control possible.

Keywords: medium-speed maglev vehicle; the problem of the suspension contact; hybrid suspension system; unequal width structure

0 引言

中低速磁悬浮列车中, 列车的悬浮力由悬浮电磁铁产生, 悬浮电磁铁的性能很大程度上决定了列车的性能。传统的悬浮电磁铁多为纯电励磁^[1], 该结构将导线缠绕在 U 型铁上, 通过电流感应的磁场, 使 U 型铁与 F 型轨道产生作用力达到列车悬浮的目的^[2]。该种结构的电磁铁有结构简单、易于控制等优点, 但是

存在悬浮力较小以及电阻损耗较大等问题^[3]。

近年来, 永磁材料的迅速发展推动了永磁与电磁混合悬浮磁铁的发展。混合悬浮较纯电励磁悬浮的优点在于: 列车正常运行时, 悬浮力主要由永磁铁提供, 导电线圈仅在必要的时候进行调节, 这就达到了“0 功率”控制的效果, 也是未来中低速磁悬浮列车悬浮电磁铁的发展方向, 很多学者已经对此展开了研究。刘少克、郭忠君等^[4]通过分析计算验证了永磁混合悬浮的可行性; 郑明华等^[5]仿真得出电磁力的变化情况并与非混合电磁铁对比; 黄斌、王莉等^[6]设计了混合悬

浮控制器并仿真验证,但这种永磁与电磁混合结构存在一个亟待解决的“吸死”问题,即随着U型铁和F型轨道间距的减小,两者之间的电磁力急剧增大,此时需要施加很大的反向电流平衡增加的磁场,极大地增加了控制的难度和成本,成为永磁混合悬浮电磁铁发展的瓶颈。针对这个问题,研究了一种基于不等宽结构的永磁与电磁混合悬浮装置^[7]。

1 不等宽悬浮装置模型

传统等宽混合悬浮磁铁的典型结构如图1所示^[8],上半部分为F型轨道,下半部分中阴影部分为永磁体。永磁体一般采用钕铁硼永磁材料,其余部分为Q235钢材;U型铁两极上绕有线圈,列车的悬浮力由永磁体与导电线圈共同产生。

不等宽结构的悬浮装置示意图如图2所示。与图1中传统混合悬浮磁铁的不同之处在于,U型铁的两极板外沿宽度大于F型轨道宽度,不再是传统的等宽结构。两者中心线仍然重合,安装于列车转向架下方。

图1结构中,假设忽略U型铁铁心和F型轨道的磁阻,忽略绕组和永磁体的漏磁通等因素,忽略导轨本身弹性振动或动态变形,则传统等宽永磁混合悬浮装置的吸引力(即悬浮力) $F(z)$ 可表示为^[9]

$$F(z) = \mu_0 S \left[\frac{N_n i + H_c h_{pm}}{2z + h_{pm} / \mu_r} \right]^2 \quad (1)$$

式中: S 为磁极有效面积; N_n 为两极线圈匝数和; H_c 为永磁体矫顽力; h_{pm} 为永磁体厚度; z 为导轨与磁铁间的气隙; μ_r 为永磁体的相对磁导率。

由式(1)可看出,在激励源、悬浮磁铁材料等其他参数不变的情况下,随着气隙 z 的减小, $F(z)$ 增大。

磁路转换为电路的等效电路图如图3所示^[10]。

图3中: R_g 、 R_{pm} 分别为气隙磁阻和内磁阻; U_c 、 U_{pm}

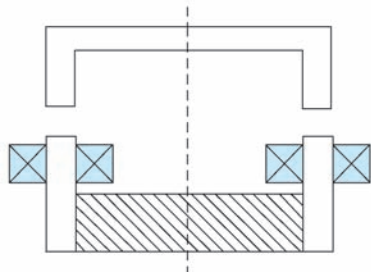


图1 传统等宽混合电磁悬浮装置示意图

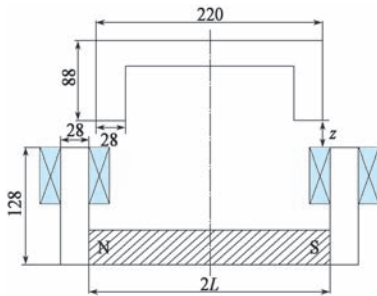


图2 基于不等宽结构的混合电磁悬浮装置示意图

为电磁动势和永磁动势。

在传统混合悬浮装置中,气隙磁阻可近似表示为

$$R_g = \frac{z}{\mu_0 S} \quad (2)$$

在其他参数不变的情况下,改变气隙大小 z ,气隙磁阻随之改变。当气隙 z 减小,气隙磁阻随之减小,磁通增大,磁感应强度增大, $F(z)$ 随之增大,气隙 z 进一步减小直至吸死状态,此时必须迅速施加很大的反向电流。

在不等宽结构悬浮装置中,错位的结构使得当气隙 z 减小时,气隙间磁通的方向与水平夹角 θ 持续减小。悬浮力为吸引力的竖直分量 $F_y(z)$ 可表示为

$$F_y(z) = F(z) \times \sin \theta \quad (3)$$

气隙 z 越小,夹角 θ 越小,吸引力的竖直分量 $F_y(z)$ 所占比重越小,因此可以缓解吸引力迅速增大的问题。与此同时,上下错位越大,夹角 θ 变化也越快,减缓吸引力增大的效果也更好,甚至有可能使悬浮力保持基本不变,这就是用不等宽结构进行优化的原因。

与传统结构相比,不等宽结构中F型轨道与U型铁间的气隙不可简化为柱状,磁路更加复杂,因此想要用解析法精确地求解吸引力十分困难,需使用ANSOFT软件进行仿真。

2 不等宽悬浮装置设计

2.1 装置设计方法

不等宽悬浮装置设计目标:①在额定气隙下悬浮力由永磁体提供;②气隙很小时不会出现悬浮力陡增导致吸死现象;③气隙变化时吸引力变化不大,抗干扰性好,节省电能。

根据上述目标,首先对0气隙状态和8 mm额定气隙状态进行仿真,选择和设计合适的永磁铁参数和U型铁尺寸。具体步骤如下:

①参考株洲中低速磁悬浮商业试验线技术指标:列车满载时单位长度质量为2.4 t,由于列车质量对称分布,单位长度下单侧悬浮质量1.2 t;F型轨道宽为220 mm;假设电磁铁纵向上无限长,其他参数见图2中的标注。

②在MAXWELL 2D中绘制如图2所示的二维模型,各部件材料为:永磁体为钕铁硼永磁材料,导线为铜,电磁铁其余部分为Q235材料。

③从小到大改变永磁体的宽度 $2L$ 。对于不同长度的U型铁,首先在额定气隙8 mm时,设定合适的永磁体参数使没有电励磁的情况下吸引力 F_8 与重力保持平衡,即 $F_8=G$ 。

此时悬浮力完全由永磁体提供,在额定状态下可对列车进行“0功率”控制。

④在此条件下,再在气隙为0时仿真得出此时的吸引力 F_0 。若此时吸引力与重力仍平衡,即 $F_0=G$ 。

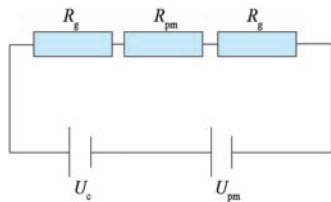


图3 等效电路图

2.2 仿真结果分析

图 4、图 5 显示了等宽和不等宽结构磁力线的分布情况。在等宽结构中,绝大多数磁力线包含在磁铁之内,漏磁通很小。而在不等宽结构中,因为磁力线总是沿着阻碍最小的路径前进,气隙中的磁场分布变得十分复杂,漏磁通也相应地增大。

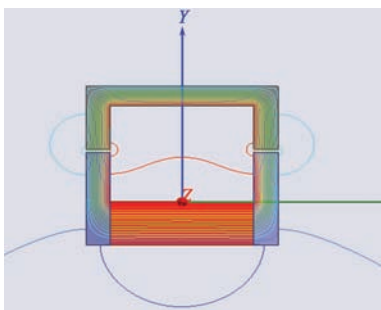


图 4 等宽结构磁力线分布

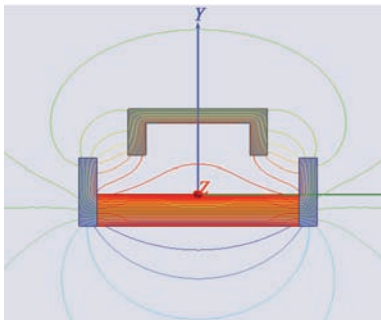


图 5 不等宽结构磁力线分布

图 6 为传统等宽结构与不等宽结构的吸引力随气隙变化的变化曲线。不难发现,随着 U 型铁宽度的不断增加,0 气隙下需要电励磁来抵消的合力呈逐渐减小的趋势。当永磁体宽度超过

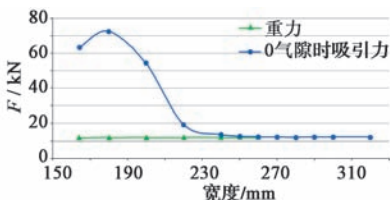


图 6 0 气隙条件下悬浮力随永磁体宽度的变化曲线

320 mm 后,0 气隙时的悬浮力都略大于重力。在宽度为 320 mm 时,零气隙和额定气隙时的悬浮力和重力基本可以抵消,因此选取该尺寸进行进一步的验证。

3 不等宽悬浮装置验证

选取永磁体的宽度 $2L$ 为 320 mm,当气隙为 0 和 8 mm 时,列车的悬浮力几乎完全由永磁体来提供,但仍需研究在其他气隙大小下的悬浮力情况,验证该尺寸不等宽结构是否满足安全性能和节能效益。改变 2 种结构气隙间距 z 的大小,仿真出不同气隙间距下的悬浮力大小,得出图 7 所示的曲线图。

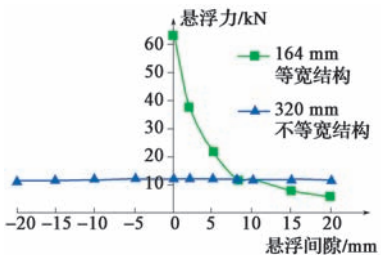


图 7 2 种结构吸引力变化曲线

从图 7 可以看出,在传统等宽结构中,气隙为 0 时的吸引力超过 60 kN,高达重力的 5 倍之多,列车在运行过程中一旦出现吸死状况,即使施加大电流产生反向的力也很难分开。另外,如果列车遇到轨道不平整或有一些抖动时,悬浮气隙稍稍小于额定气隙,悬浮力就迅速增大,需要施加很大的电流才能抵消,让控制变得十分困难,同时也需要消耗很多电能。

而在不等宽结构中,处于 0 和 8 mm 的任意一个气隙大小,悬浮力都可以保持与重力基本平衡,只需要很小的电励磁进行调节,基本实现了“0 功率”控制,相对于传统等宽结构具有很大的优越性。

除此之外,悬浮气隙越大,控制余量越大,列车越不容易发生砸轨事故,列车运行时的安全性更高。从图 7 中可以看出,当气隙超过 8 mm 的额定气隙,甚至到达 20 mm 时,悬浮力依然基本保持不变。所以,不等宽结构可使得列车运行在更大的额定悬浮气隙下,并且安全裕度很大,即使发生扰动,悬浮力的大小也几乎不受影响,极大地提高了安全性能。

另外值得注意的是,因为不等宽的结构,F 型轨道和 U 型电磁铁可能存在互相侵入的情况,即悬浮气隙为负数。但由仿真可以看到,即使在这种情况下,悬浮力也并没有出现显著增大。但是出于安全考虑,防止可能发生的吸死或砸轨的情况,悬浮装置中需要设置机械防护装置来防止这种互相侵入的现象。

4 结语

综上所述,不等宽的结构很好地解决了传统结构存在的问题。无论在何种工作状态,通过合理的设计,都可以使得吸引力始终与重力保持基本平衡,既解决了小气隙间距下易吸死的难题,又可以实现“0 功率”控制,为中低速磁悬浮电磁铁设计提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 罗芳,张昆仑.常导磁悬浮车悬浮电磁铁的电磁场分析[J].机车电传动,2002(1):27-28.
- [2] 罗芳,张昆仑.悬浮列车 U 型悬浮电磁铁电磁力的数值计算与分析[J].机车电传动,2002(2):32-34.
- [3] 霓鸿雁.基于 ANSOFT 磁悬浮列车悬浮电磁铁的动态性能分析[J].大众科技,2005(5):192-195.
- [4] 刘少克,郭忠君,郑明华,等.中低速磁悬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.
- [5] 郑明华,刘少克.基于 Maxwell 的混合悬浮电磁铁电磁特性研究[J].微特电机,2009(12):13-18.
- [6] 黄斌,王莉,王飞飞,等.永磁与电磁混合悬浮系统数学模型的研究与仿真[J].电气开关,2009(5):35-41.
- [7] 刘国清,张昆仑,陈股,等.一种用于磁浮列车的串联型永磁混合悬浮装置:中国,201310207241.9[P].2013-05-29.
- [8] 王莉,熊剑,张昆仑,等.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):50-54.
- [9] 王莉.混合 EMS 磁悬浮系统研究[D].成都:西南交通大学,2006.
- [10] 张颖,陈慧星,吴志添,等.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.



作者简介:金 森(1995-),男,研究方向为轨道交通电气化。