

# 高速列车混合励磁涡流制动系统的设计与分析\*

严国斌, 方攸同\*, 张帆

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 相比于单独磁源励磁的涡流制动方式, 混合励磁涡流制动有着可控且节能、适用于多种制动模式等优势。针对高速列车制动时制动功率消耗大的问题, 为满足制动安全可靠的需要, 根据电磁场原理提出了一种混合励磁轨道涡流制动系统, 阐明了机械系统进行制动器的提放动作、电磁系统进行涡流制动的工作过程。通过对电磁系统进行有限元分析(FEM), 对速度、气隙、励磁电流等因素对制动力、吸引力的影响进行了讨论, 并在此基础上对电磁系统的结构进行了优化。优化结果表明制动系统达到了更好的性能。

**关键词:** 高速列车; 混合励磁; 轨道涡流制动; 有限元分析; 优化

中图分类号: TH39; TM359.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)08-0019-04

## Design and analysis of hybrid excitation rail eddy current brake system of high-speed train

YAN Guo-bin, FANG You-tong, ZHANG Fan

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Compared to eddy current braking pattern with single magnetic source exciting, hybrid excitation rail eddy current brakes has advantages, that is, controllable, energy saving and various-operating-modes. Aiming at large braking power consumption of high-speed train, a hybrid excitation rail eddy current brake system, which is based on the principle of electromagnetic field, was proposed to fulfill the needs of safety and reliability. Then the working processes of mechanical lifting system and electromagnetic system were demonstrated. With electromagnetic system analyzed using finite element method(FEM), the factors such as speed, air gap, exciting current, which have influences on braking force and attractive force, were discussed. On the basis of that, the optimization of the electromagnetic system was done. The results indicate that the system can work better.

**Key words:** high-speed train; hybrid excitation; eddy current brake; finite element method(FEM); optimization

## 0 引言

高速列车的制动系统作为高速列车九大关键技术之一, 对于列车的运行可靠性与安全性至关重要。高速列车目前采用的制动方式主要是再生制动和盘式制动, 这两种方式在 300 km/h 及以下高速列车上得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>, 而在 350 km/h 及以上的高速列车设计上, 借鉴先前的经验和成果, 根据已有的制动系统的适用性, 考察高速情况下新的制动方式已经成为迫切的需求。正因如此, 如果在高速区使用涡流制动, 在低速或即将停车时再配合采用其他制动方式, 则能大大降低能耗, 是一种经济效益和技术性能较好的制动方案。

现有的涡流轨道制动系统并非完美无缺, 以德国

ICE3 上的制动器为例<sup>[2-3]</sup>, 首先, 采用释压下放能保证当空气系统失效时风缸动作, 但当电路失效时由于失去励磁也将直接导致制动力丧失, 为此 ICE3 安装了大容量电池作为后备电源, 这就影响了列车的轻量化。其次, 当列车停放时电源切断, 单纯电励磁涡流制动不能工作; 除此以外, 励磁功率过大和因此而导致的发热也是有待解决的难题。

在此背景下, 本研究提出一种混合励磁轨道涡流制动系统, 为进一步解决既有制动系统在故障导向安全、停放制动等方面存在的问题和黏着限制打下基础。

## 1 轨道涡流制动系统及其原理

本研究提出的混合励磁轨道涡流制动系统的结构

收稿日期: 2010-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877070); 浙江省自然科学基金资助项目(R1080069)

作者简介: 严国斌(1984-), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生, 主要从事直线电机方面的研究. E-mail: eeygb@zju.edu.cn

通信联系人: 方攸同, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: youtong@zju.edu.cn

如图 1 所示。

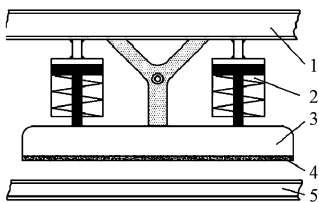


图 1 混合励磁轨道涡流制动系统原理图

1—转向架构架侧梁;2—升降风缸;3—制动磁系统;4—磨耗板;5—钢轨

此系统主要是由空气提升系统、制动器磁系统以及制动系统辅件等组成。涡流制动的原理这里不多赘述。混合涡流制动系统在列车高速制动时,通过永磁体励磁并在轨道中形成涡流制动,同时可在励磁线圈中的辅助励磁电流中进行正向激励,保证列车的等减速度,使列车制动过程可动态调节。

当列车速度达临界值并满足粘着制动的要求时,电磁系统将被放下与轨道接触,此时辅助励磁电流减小或者关闭,制动器依靠永磁体的吸引力将磨耗板紧压在钢轨上,通过摩擦将列车在低速时的动能转换为热能消耗掉,从而实现制动。

在制动缓解状态下,利用电枢线圈的辅助励磁电流的反向激励作用,抵消永磁磁极的吸引力作用,提放系统则采用很小的力就可以提升制动器磁系统,有助于制动缓解过程的恢复。

### 1.1 制动器的提放系统

混合式涡流轨道制动系统通过安装在转向架构架侧梁上的升降风缸来控制制动器磁系统的升降提放,使制动器磁系统和磨耗板接近和远离轨道,进而确定磁系统的工作状态。

#### 1.1.1 缓解状态(解除制动)

当制动器处于缓解状态时,控制阀被挤压使得升降风缸的上腔与大气相通,升降风缸在内置弹簧的作用下处于提升位置,使得制动器磁系统与铁路轨道保持一定的距离,列车处于非制动状态。处在缓解模式下的制动提放系统如图 2 所示。

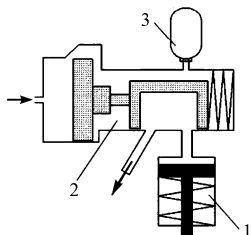


图 2 缓解模式下制动提放系统的示意图

#### 1.1.2 制动状态

在制动器处于制动状态时,控制阀的左侧腔泄压,控制阀在右侧腔内置弹簧的作用下向左运动,升降风缸上腔与副风缸相通,并在副风缸高压气体压力作用下向下运动,使得制动器磁系统与钢轨位置接近,如图 3 所示。

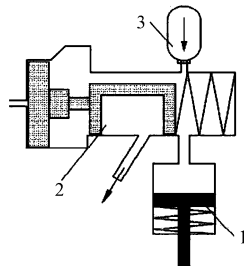


图 3 制动模式下制动提放系统的示意图

1—升降风缸;2—控制阀;3—副风缸

### 1.2 制动器的磁系统

制动器磁极中包括永磁体和励磁线圈,其结构如图 4 所示。

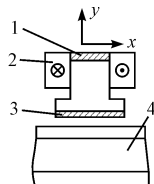


图 4 制动器磁系统的结构示意图

1—永磁体;2—励磁绕组;3—制动片(磨耗板);4—钢轨

#### 1.2.1 制动器磁系统的结构设计

从原理上讲,混合励磁涡流制动器可以看作是一台特殊的非正弦磁场短初级感应直线电机,包括初级轭部、初级励磁绕组、永磁体、磨耗板及钢次级。初级励磁绕组为直流励磁,每个磁极铁芯与磁轭之间镶嵌钕铁硼永磁体,次级即为钢轨。制动器磁系统的总体示意图如图 5 所示。

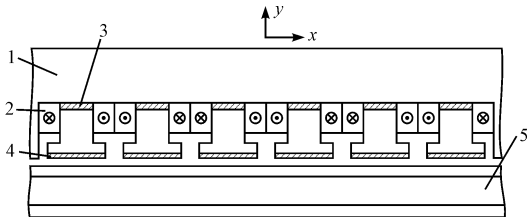


图 5 制动器磁系统的总体示意图

1—磁轭;2—励磁绕组;3—永磁体;4—制动片(磨耗板);5—钢轨

制动器与钢轨间的气隙磁场由永磁体与励磁绕组两者共同产生,当列车运行时以永磁体为主提供气隙磁场,直流励磁绕组仅提供小部分的气隙磁场,故可以用来调节气隙磁场,使磁场的控制容易实现,进一步达

到控制制动力的作用。

### 1.2.2 制动器的主要参数

参考文献[4]中混合励磁直线电机的结构设计,本研究给出了涡流制动器的模型,并在此模型基础上进行了仿真。

表1 混合励磁轨道涡流制动器的参数

极数	6
极距	45 mm
永磁体尺寸(长×厚)	20 mm×4 mm
永磁体型号	N35SH
磁轭厚度	32 mm
磨损板长度	35 mm
磨损板厚度	3 mm
初级励磁绕组匝数	395

在混合励磁涡流制动器中,永磁体产生的磁场作为气隙磁场的主要部分,而气隙磁场会受涡流磁场和电励磁磁场的共同影响,所以在设计制动器时特别要注意永磁体的最大去磁工作点,以防不可逆退磁;同时也得避免由电励磁磁场过大引起的磁路过饱和。本研究中混合涡流制动器选用的永磁体是钕铁硼 N35SH,假设工作温度为 75 °C,那么根据下列公式:

$$B_r = [1 + (t - 20) \frac{\alpha_{Br}}{100}] B_{r20} \quad (1)$$

可得在工作温度下永磁体的剩余磁通密度为  $B_r = 1.13 \text{ T}$ 。

其中,  $B_{r20}$  为 20 °C 时永磁体的剩余磁通密度;  $\alpha_{Br}$  为剩余磁通密度的不可逆转换系数,其值一般为  $-0.12\% \text{ K}^{-1}$ ,而在此工作温度下永磁体的矫顽力  $H_c = 847\ 138 \text{ A/m}$ ,则退磁曲线的相对磁导率为:

$$\mu = \frac{B_{r20}}{\mu_0 H_{c20}} = 1.062 \quad (2)$$

其中,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。

在上面的模型中,永磁体的磁化方向是  $y$  方向,其磁化方向长度为 4 mm,故永磁体的计算磁动势为:

$$F_c = H_c h_{pm} = 3\ 388.552 \text{ A} \quad (3)$$

为避免过大励磁电流导致电机磁场过度饱和,正向励磁时电流不宜过大,同样在加反向电流时也要注意电励磁对永磁体的退磁影响,故电励磁磁动势的绝对值应小于永磁体的计算磁动势。

经过计算,当励磁电流小于 4.2 A 时,励磁绕组所产生磁动势都小于永磁体计算磁动势,因此电励磁绕组不会致使永磁体发生不可逆退磁。

## 2 仿真分析

单独励磁时气隙、励磁电流等因素都会影响到制动

系统的制动力<sup>[5-8]</sup>,为了分析混合励磁涡流制动器的性能,本研究在商用软件 ANSYS 中建立了模型,并分别对未加励磁和加入励磁时涡流制动器的性能进行了分析。

### 2.1 未加励磁时不同气隙对制动力/吸引力的影响

未加励磁时,混合励磁涡流制动系统即为永磁体单独励磁的涡流制动系统,本研究对此种励磁情况下工作在不同气隙情况的涡流制动器进行仿真分析,得出了制动力-速度的曲线,如图 6 所示。

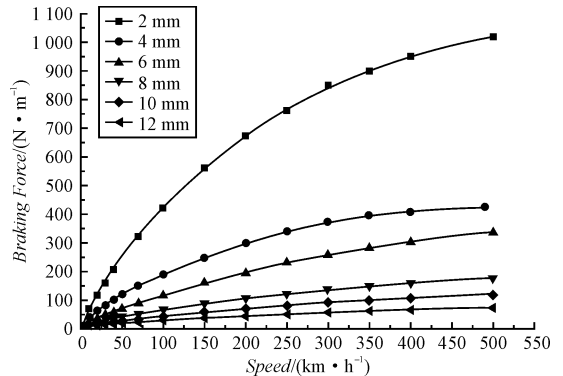


图6 永磁励磁时不同气隙下对制动力的影响

由上图可以看出,气隙越小制动力越大,并且力的变化量也越大,但是随着速度的增加这种变化越来越小并趋于平缓。这说明在高速时制动器能够提供一个变化量较小、相对较为平稳的制动力。

因为吸引力对于提放系统的工作有影响,所以笔者通过仿真得出了吸引力与速度的关系,如图 7 所示。

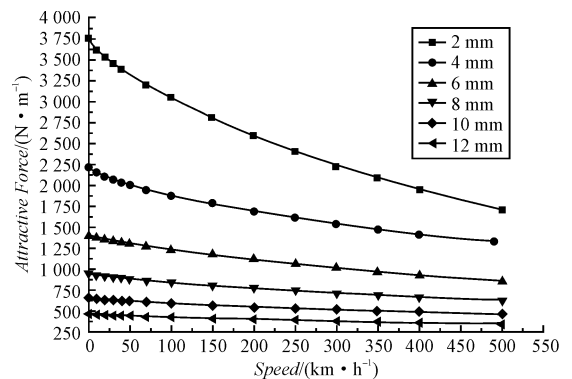


图7 永磁励磁时不同气隙对吸引力的影响

由上面两图可以看出,当气隙大于 6 mm 时,无论是制动力还是吸引力,其数值随速度的变化而变化得很小,当气隙越大时,这种变化越小以至于使力的大小趋于稳定。

### 2.2 通入励磁时不同气隙对制动力/吸引力的影响

混合涡流制动器的直流励磁绕组为 395 匝,当励磁电流为 2 A 时,制动器在不同气隙下的制动力与速度的关系如图 8 所示。

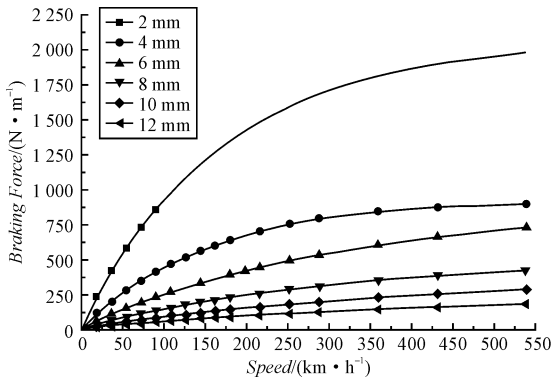


图 8 混合励磁时不同气隙下的制动力-速度曲线

混合励磁情况下制动力的变化范围相比永磁体单独励磁时大大增加,这对于列车在高速运行时实行制动而言,可以提高制动力使制动距离缩减。

同样的,混合励磁情况下吸引力的变化范围也大大增加,这使得提升系统能够更加轻松的将制动器提升或放下。此外,通过调节励磁电流可以方便的控制制动力或吸引力的大小,这为动态控制制动力、维持较为恒定的制动力都提供了可行性。吸引力与速度的关系如图 9 所示。

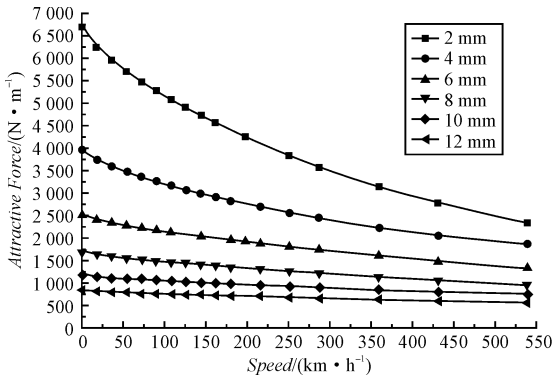


图 9 混合励磁时不同气隙下吸引力-速度曲线

### 2.3 结构优化及其仿真

通过仿真可以看出,原有结构下磁系统仍需要进一步优化,如初级轭部厚度、永磁体位置及尺寸等。因为磁极齿部漏磁很大,故尝试在磁极齿部加入隔磁材料,其结构如图 10 所示。

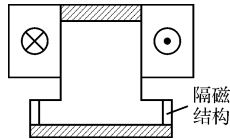
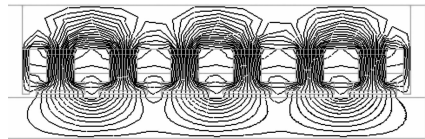


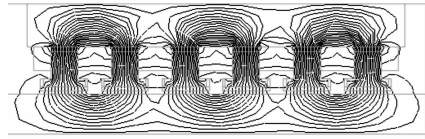
图 10 加入隔磁材料后的磁极优化

在未通入励磁电流的情况下,对加入隔磁材料前后的混合涡流制动器磁系统进行仿真,从仿真结构上可以明显看出齿部漏磁的改善,如图 11 所示。

由图 11 可以看出,加入隔磁材料后的磁极的齿漏磁减少了很多,而相应的磁系统与钢次极的耦合也增强了,这样涡流制动器与钢轨间的作用力也会加强,这对于在列车高速运行时的制动将起到更好的效果。



(a) 优化前磁系统的磁密情况



(b) 加入隔磁材料优化后磁系统的磁密情况

图 11 优化前后磁系统的磁密情况

### 3 结束语

混合励磁轨道涡流制动系统属于非黏着系统,而不受黏着条件的限制,相比传统黏着制动其具有无磨损、制动效果好等优点;同时,相对单独励磁涡流制动而言,一方面混合励磁涡流制动的可控性比较好,可以通过调节其中的励磁电流来控制制动力的变化,另一方面制动时不需消耗大量电能,具有节能意义。

此系统既可以通过空气提升系统实现制动系统故障导向安全性能,也可以在制动过程中关闭励磁电流,利用永磁体吸引力将磨损板与钢轨吸合,进行黏着制动,因此此混合涡流制动系统集成了磁轨制动和轨道涡流制动这两种方式的功能,不但能极大地节约能源,而且减少了动力损耗。

混合励磁涡流制动系统具有如此重大意义和强大的功能,必将成为下一代制动方式的重点研究对象,因而关于此系统的分析优化将会被进一步细致深入的研究,为实际产品的生产打下基础。

### 参考文献 (References):

- [1] 张曙光. 高速列车设计方法研究[M]. 北京:中国铁道出版社,2009.
- [2] [德]KUNZ M, 王渤洪,黄济荣. ICE3 的线性涡流制动—技术观点和运行经验[J]. 变流技术与电力牵引,2005 (2):4-8.
- [3] [德]GRABER J, 张彦濡. ICE3 列车直线涡流制动装置[J]. 国外机车车辆工艺,2003(5):1-6.
- [4] 卢琴芬,叶云岳. 混合励磁直线同步电机的磁场与推力[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):127-130.
- [5] 蔡家利,刘 壮,张仲超. 电磁铁涡流制动分析与设计[J]. 机电工程,2007,24(8):84-86.
- [6] 唐永春,叶云岳. 永磁涡流制动的有限元分析与设计[J]. 微电机,2006,39(3):34-36.
- [7] 郭其一,胡景泰,路向阳,等. 高速列车线性涡流制动的特性研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(6):804-807.
- [8] DIETRICH A B, CHABU I E, CARDOSO J R. Eddy-current brake analysis using analytic and FEM calculations[J]. IEEE Transaction on Magnetics,2001,37(5):454-461.

[编辑:柴福莉]