

# 磁轨制动器主要部件参数的最优仿真设计

王相波 王晓东

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司,266111,青岛//第一作者,工程师)

**摘 要** 为研究磁轨制动器各子部件的结构和安装方式对其性能的影响,分析了磁轨制动器的结构组成,以减重和制动吸力为目标,对铁心和磁轭、磨损板、减重倒角及线圈等子部件的参数进行最优值计算。仿真分析了制动器与轨面间隙不同时的吸力值,得到了最优磁轨制动器与轨面间的最优间隙。

**关键词** 车辆;磁轨制动器;部件参数优化;仿真

中图分类号 U270.356

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.12.046

## Optimal Simulation Design of Magnetic Rail Brake Main Component Parameters

WANG Xiangbo, WANG Xiaodong

**Abstract** To study the influence of structure and installation method of each magnetic rail brake component on brake performance, the structure composition of magnetic rail brake is studied. Taking weight reduction and brake suction force as objectives, the optimal value of parameters of components including core and yoke, wear plate, weight reduction chamfer and coil are calculated. The suction force values under different clearances between brake and rail surface are analyzed and the optimal working clearance is obtained.

**Key words** vehicle; magnetic rail brake; component parameter optimization; simulation

**Author's address** CRRC Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

有轨电车低地板车辆和部分地铁车辆的紧急制动减速度要求高于普通轨道交通车辆,其减速度可达  $2.8 \text{ m/s}^{[2]}$ 。为了实现该目标减速度,需采用非黏着制动方式。目前日本、德国及法国等国家研发并应用了空气翼板制动、涡流轨道制动、磁轨制动及涡流盘式等非黏着制动方式<sup>[2]</sup>。作为非黏着制动方式的一种,磁轨制动不依赖轮轨黏着,制动效果显著,可提高安全性;磁轨制动器质量轻,对转向架结构和车辆走行影响小;其构造简单,工作可靠,少维修;制动时对轨面具有清扫作用,可改善轮

轨黏着<sup>[3]</sup>。目前,对于磁轨制动的研究集中于提高磁能利用率的新型合成材料的开发、磁轨制动器的结构优化、磁场分析、转矩特性分析及制动过程的热平衡分布情况研究等<sup>[4-5]</sup>。

本文主要研究磁轨制动器各子部件的结构和安装方式对其性能的影响,通过分析磁轨制动器的结构组成,通过仿真计算找到铁心和磁轭、磨耗板、减重倒角及线圈等子部件的参数最优值,进而研发出一种完全满足应用要求,且质量较轻、结构简单、安全可靠的磁轨制动器。

## 1 磁轨制动器的结构

磁轨制动器由磁体装置、传力装置和悬挂装置组成,如图 1 a)所示。其中,磁体是核心部件,主要由线圈绕组、铁心、滑靴、隔板、隔热材料、密封钢板和相关连接件等组成,如图 1 b)所示。

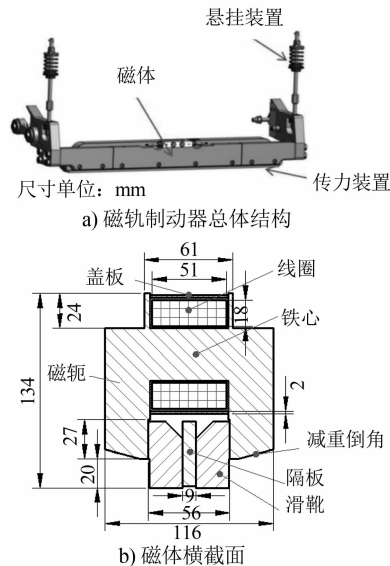


图 1 磁轨制动器结构

Fig. 1 Structure of magnetic rail brake

## 2 磁轨制动器关键部件的最优尺寸

本文忽略螺纹孔及螺栓等细节结构和断面效

应,仿真分析滑靴长度为 1 200 mm 的电磁体与轨道间的吸力。滑靴、铁心和磁轭均为 DT4C 电工纯铁。仿真时,磁体采用普通材料,隔板材料为铝。磁轨制动器的设计吸力  $F$  应为 75.6 kN。影响  $F$  的电磁体部件主要尺寸参数如图 2 所示,初步设计尺寸及参数如表 1 所示。

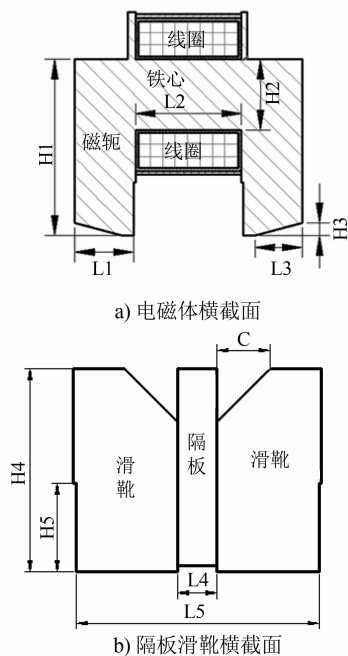


图 2 影响吸力的电磁体主要部件

Fig. 2 Key electromagnet components influencing suction force

表 1 电磁体初始设计参数

Tab. 1 Initial design parameters of electromagnet		
设计参数	计算说明	计算结果
极面规格	最小接触	长 964.0 mm×宽 23.3 mm, 2 个极面,取整为 45 000 mm <sup>2</sup>
	最大接触	长 988.0 mm×宽 23.3 mm, 2 个极面,取整为 46 000 mm <sup>2</sup>
间隙	启动时	7~10 mm
	制动时	0
线圈匝数/匝	设计值 (17 匝/组×9 组)	153
线圈总截面积/mm <sup>2</sup>	设计值 (18 mm×51 mm)	153
线圈填充系数 $K_c$	由工艺流程	0.9
电流密度 $J/(A/mm^2)$	设计值	6(铜)
额定电流/A		40
线圈电阻/ $\Omega$		0.6
线圈形式、线规	设计值	铜漆包线:矩形截面, 3 mm×2 mm
铁心临界磁通密度/T	材料为纯铁	1.5
侧极板临界磁通密度/T	材料为纯铁	1.5
隔板导磁率	隔板为铝合金	按空气考虑
轨道临界磁通密度/T	材料为 Q235 或 T7	1.5

2.1 铁芯与磁轭的最优尺寸

在  $H_1$  和  $L_2$  给定的条件下(见图 2),铁心与磁轭的尺寸参数主要为磁轭宽度  $L_1$  和铁心厚度  $H_2$ 。按  $L_1$  取值区间为 30~50 mm,取值间隔为 2 mm,对电磁体吸力  $F$  进行仿真计算,结果如图 3 所示。

由图 3 可知: $H_2$  越大, $L_1$  越大, $F$  越大;当  $L_1$  和  $H_2$  取不同值时, $F$  的最小值增至最大值仅相差 3.757 kN;当  $L_1 \geq 28$  mm 时, $F$  都能满足设计要求。为减轻制动器的整体质量,应使  $L_1$  和  $H_2$  尽可能小。经综合考虑,铁心与磁轭的最优尺寸为  $H_2 = 36$  mm、 $L_1 = 28$  mm。

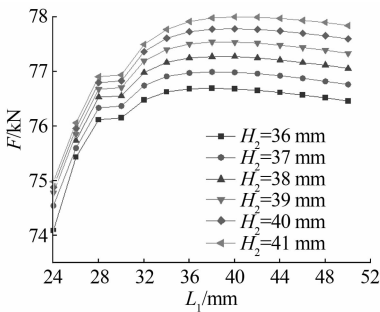


图 3  $L_1$  和  $H_2$  对  $F$  的影响曲线

Fig. 3 Influence curve of  $L_1$  and  $H_2$  on  $F$

2.2 磨耗板最优尺寸

磨耗板尺寸参数包括间隙  $L_4$ 、总宽度  $L_5$ 、磨耗板高度  $H_5$  和倒角  $C$ 。仿真计算中, $L_4$  取值区间为 3~13 mm、取值间隔为 2 mm; $L_5$  取值区间为 56~66 mm,取值间隔为 2 mm。仿真计算结果如图 4 所示。按  $H_5$  取值区间为 12~20 mm、取值间隔 2 mm 进行仿真计算,结果如表 2 所示。按  $C$  取值区间为  $3^\circ \sim 13^\circ$ 、取值间隔  $2^\circ$  进行仿真计算,结果如表 3 所示。

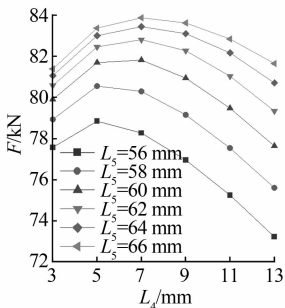


图 4  $L_4$  及  $L_5$  对  $F$  的影响曲线

Fig. 4 Influence curve of  $L_4$  and  $L_5$  on  $F$

由图 4 可知:制动器与钢轨吸合时, $L_5$  越大, $F$  越大;当  $L_4$  过大或过小时, $F$  较小;当制动器与钢轨未吸合时,如  $L_4$  过小,则会产生很大漏磁。因此,综合考虑图 4、表 1 及表 2 的数据,在满足磁轨制动器

表 2 不同  $H_5$  对应的  $F$  仿真数据

$H_5/\text{mm}$	$F/\text{kN}$
12	79.607
14	78.608
16	77.704
18	76.878
20	76.117

表 3 不同  $C$  对应的  $F$  仿真数据

$C/(\circ)$	$F/\text{kN}$
4	73.880
6	73.996
8	74.121
10	74.425
12	74.354
14	74.370
16	74.222
18	73.819

与钢轨吸合时设计吸力的基础上, $C$  和  $L_4$  应尽量取大, $L_5$  和  $H_5$  应尽量取小。综上所述,磨耗板最优尺

寸取  $L_4=9\text{ mm}$ ,  $L_5=56\text{ mm}$ ,  $H_5=16\text{ mm}$ ,  $C=14^\circ$ 。

2.3 减重倒角的最优尺寸

减重倒角参数为纵向尺寸  $H_3$  和垂向尺寸  $L_3$ 。仿真计算中, $H_3$  取值区间为  $3\sim 27\text{ mm}$ 、取值间隔为  $3\text{ mm}$ ,  $L_3$  取值区间为  $3\sim 27\text{ mm}$ 、取值间隔为  $3\text{ mm}$ 。仿真结果如表 4 所示。

根据表 4 可知:减重倒角越小, $F$  越大; $H_3$  在取值范围内时的磁化饱和度非常低,故  $H_3$  变化对  $F$  影响不大;当  $L_3\geq 15\text{ mm}$  时,随着  $L_3$  的增加, $F$  下降速度加快。为起到减重作用,在  $F$  满足要求时应使  $H_3$  与  $L_3$  尽量大。综上所述,减重倒角最优尺寸取  $H_3=27\text{ mm}$ ,  $L_3=15\text{ mm}$ 。

2.4 制动器与轨面间隙不同时的  $F$

根据上文,磁轨制动器关键部件的最优尺寸为: $L_1=28\text{ mm}$ ,  $L_3=15\text{ mm}$ ,  $L_4=9\text{ mm}$ ,  $L_5=56\text{ mm}$ ,  $H_2=36\text{ mm}$ ,  $H_3=27\text{ mm}$ ,  $H_5=16\text{ mm}$ 。经仿真,在最优尺寸下, $F=75.71\text{ kN}$ , 满足  $70.0\sim 75.6\text{ kN}$  的要求。此时,制动器与轨面间隙  $s$  不同时的  $F$  仿真结

表 4 不同  $H_3$  和  $L_3$  对应的  $F$  仿真数据

$L_3/\text{mm}$	不同 $H_3$ 对应的 $F/\text{kN}$								
	$H_3=3\text{ mm}$	$H_3=6\text{ mm}$	$H_3=9\text{ mm}$	$H_3=12\text{ mm}$	$H_3=15\text{ mm}$	$H_3=18\text{ mm}$	$H_3=21\text{ mm}$	$H_3=24\text{ mm}$	$H_3=27\text{ mm}$
3	76.243	76.240	76.241	76.240	76.240	76.240	76.240	76.240	76.240
6	76.242	76.241	76.242	76.242	76.242	76.242	76.242	76.242	76.242
9	76.223	76.223	76.223	76.223	76.223	76.223	76.223	76.224	76.223
12	76.174	76.174	76.170	76.175	76.174	76.170	76.170	76.170	76.170
15	76.049	76.046	76.049	76.049	76.049	76.049	76.049	76.046	76.046
18	75.825	75.825	75.825	75.825	75.826	75.825	75.825	75.827	75.827
21	75.504	75.504	75.504	75.504	75.504	75.504	75.504	75.504	75.504
24	75.092	75.092	75.092	75.096	75.092	75.095	75.092	75.092	75.092
27	74.610	74.614	74.614	74.614	74.614	74.614	74.614	74.614	74.614

表 5 不同  $s$  对应的  $F$  仿真数据

$s/\text{mm}$	0	7	8	9	10	11
$F/\text{kN}$	75.71	4.88	3.89	3.16	2.61	2.18

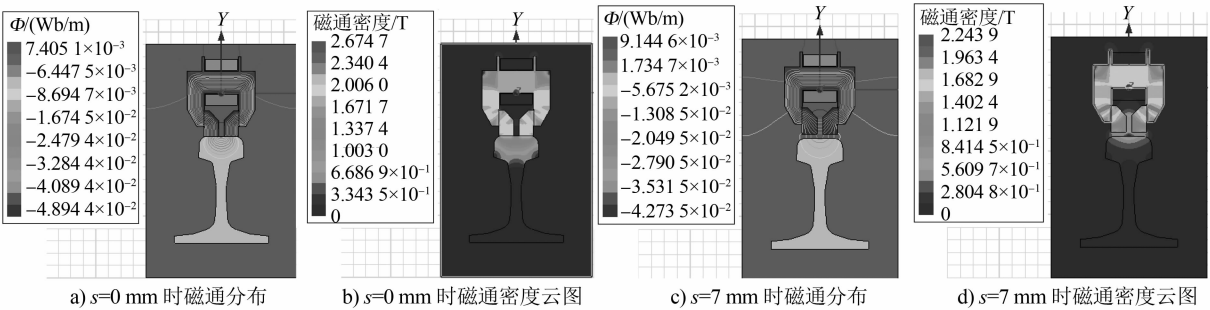


图 5 磁通分布和磁通密度云图

Fig. 5 Nephogram of magnetic flux distribution and flux density

## 2.5 线圈参数最优值

在完全理想的情况下,有<sup>[6]</sup>:

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

式中:

$\Phi$ ——气隙磁通;

$S$ ——气隙面积;

$B$ ——气隙磁感应强度;

$\mu_0$ ——空气磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})$ 。

在实际运行环境中,由于磁路漏磁不可避免,故仅有部分线圈磁势在工作气隙中起作用,即

$$F = \frac{B^2 S}{2K_f^2 \mu_0} \quad (2)$$

式中:

$K_f$ ——漏磁系数,由磁路组成确定;根据磁路设计的差异, $K_f$ 可取 1.0~10.0,在电磁设计中通常按经验取 1.2~5.0。

此外,由于

$$\Phi = \frac{IN}{R_m} \quad (3)$$

故

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{(IN)^2 S}{2\mu_0 R_m^2} \quad (4)$$

式中:

$R_m$ ——磁阻;

$N$ ——线圈匝数;

$I$ ——导线额定电流。

由式(4)可知,确定  $F$  的主要参数为  $N$ 。根据设计目标,电流额定、线圈总截面按照表 1 所示参数,因此,需要确定  $N$  和每根导线的截面积  $A$ 。在 Ansoft 电磁仿真软件中通过直接加载电流密度  $J$  来调整  $F$ ;当其它参数一定时, $J$  越大,则  $F$  越大。假设:导线额定电流为  $I$ ,每根导线截面积为  $A$ ,电阻率为  $\rho$ ,导线平均长度为  $L$ ,每匝线圈电阻为  $R$ ,总电阻为  $R_{\text{总}}$ ,则有:

$$\begin{cases} R = \rho \frac{L}{A} = \frac{R_{\text{总}}}{N} \\ J = \frac{I}{A} \end{cases} \quad (5)$$

进而可知,在最优情况下,有:

$$J = \frac{IR}{\rho L} \quad (6)$$

其中, $I$ 、 $R_{\text{总}}$  及  $\rho$  为确定值,每匝线圈平均长度  $L$  根据线圈总截面积确定。所以,只需先确定  $J$  的最优值,然后根据式(6)得出  $R$  的最优值,即可由式(5)确定  $N$  的最优值。

## 3 结语

本文仿真分析了磁轨制动器的铁心、磁轭、磨耗板、减重倒角及线圈等子部件的参数对磁轨制动器制动吸力影响规律,以减重和制动吸力为目标,通过计算分析,得到了磁轨制动器主要尺寸参数的最优值。在此基础上分析了  $S$  不同时的  $F$  值,进而得到了最优尺寸磁轨制动器的  $S$  最优值。

## 参考文献

- [1] 杜凯军,韩龙,王斌儒,等. 低地板有轨电车制动系统总体技术方案设计研究[J]. 铁道机车车辆,2016(5):126.  
DU Kaijun, HAN Long, WANG Binru, et al. Design and research of general technology scheme for low-floor tram brake system[J]. Railway Locomotive & Car, 2016(5):126.
- [2] 邵林,张犀,杨欣. 更高动车组非黏着制动应用研究[J]. 铁道机车车辆,2016(3):37.  
SHAO Lin, ZHANG Xi, YANG Xin. Research of non-adhesion braking application on high-speed EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2016(3):37.
- [3] 王可,丁福焰,宋跃超,等. 低地板有轨电车磁轨制动装置的研究[J]. 铁道机车车辆,2016(3):92.  
WANG Ke, DING Fuyan, SONG Yuechao, et al. Study of magnetic track brake equipment for low floor tramcar[J]. Railway Locomotive & Car, 2016(3):92.
- [4] CHOI J S, YOO J. Optimal design method for magnetization directions of a permanent magnet array[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010(322):2145-2151.
- [5] BAE H S, PARK M K. A study of the torque characteristics of small disk brake using magnetic fluid[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011(25):349-355.
- [6] 智廉清,吴培元,林台平,等. 近代铁道制动技术[M]. 北京:中国铁道出版社,1983.  
ZHI Lianqing, WU Peiyuan, LIN Taiping, et al. Modern railway braking technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983.

(收稿日期:2020-07-07)