

研
究
开
发

旋转型永磁涡流制动装置的研究

倪文波¹, 赵 科², 王雪梅¹, 蒋冬青¹, 李 芾¹(1. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031;
2. 河南工程学院 机械工程系, 河南 郑州 451191)

作者简介: 倪文波(1969-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为机车车辆主动控制技术、列车制动技术。

摘要: 研究了一种适用于非动力车辆的非摩擦制动技术——旋转型永磁涡流技术。根据涡流制动原理, 以CRH2拖车转向架为对象, 设计了旋转型永磁涡流制动装置。运用ANSYS软件着重进行了旋转型永磁涡流制动装置磁场的瞬态分析, 得到在不同速度下感应盘所能提供的制动功率。最后从制动装置的永磁体磁极对数、磁极周向距离、极片厚度、空隙宽度等方面对漏磁造成的运行阻力进行了分析, 并提出相应的措施。

关键词: 永磁涡流制动; ANSYS 软件; 磁场; 制动

中图分类号: U260.357

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2011)01-0017-03

Research on Rotating Permanent Magnet Eddy Current Brake

NI Wen-bo¹, ZHAO Ke², WANG Xue-mei¹, JIANG Dong-qing¹, LI Fu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Henan College of Engineering, Zhengzhou, Henan 451191, China)

Abstract: This paper studied the non-friction rotating permanent magnet eddy current brake technique, which was used on non-powered vehicles. Based on the theory of eddy current brake, the rotating permanent magnet eddy current brake was designed according to the structure of CRH2 EMU's trailer bogie. The dynamic analyses of rotating permanent magnet eddy current brake was made by ANSYS, the brake's power at different speeds was calculated. At different numbers of pole pairs, circumferential distances of the pole, thickness of pole pad and gap widths of rotating permanent magnet eddy current brake, the running resistances caused by leakage of magnet field were analyzed. The conclusions got from this article provide some theory foundations for application of the rotation eddy current brake.

Key words: permanent magnet eddy current brake; ANSYS; magnet field; brake

0 引言

随着轨道交通不断向高速发展, 列车制动系统将面临着越来越严峻的挑战。列车的动能将随速度的平方成正比增加, 要在较短的制动时间和规定距离内将如此巨大的动能转化、消散或移走, 需制动系统提供足够大的制动功率。而现在大多数列车使用的踏面或盘形制动, 其闸瓦摩擦系数随速度提高而不断减小, 即随列车速度的提高, 制动力不断减小^[1]。因此, 对于速度超过200 km/h的列车, 必须寻求另外一种更为可靠有效的制动方式。从另一方面考虑, 采用机械摩擦制动时制动装置吸收的能量过大, 将会造成制动盘及

闸片因磨耗及摩擦热的影响而产生变形甚至产生裂纹, 从而产生大量的有害粉尘污染, 导致制动盘的维修周期较短。非摩擦制动技术作为解决此问题的一种关键技术, 得到了人们越来越多的重视, 如目前在装有电机的机车或动车上广泛应用了再生制动和电阻制动。

所谓非摩擦制动主要指能耗制动, 有3种主要形式: 电阻制动、再生制动和涡流制动。受制动机理的约束, 再生制动和电阻制动无法在没有牵引电机的拖车车辆上使用, 而涡流制动打破了这种限制, 因此, 可以采取涡流制动和再生(或电阻)制动相结合的方式共同来实现高速动车组的制动。

1 旋转型永磁涡流制动装置的结构

根据涡流制动装置的工作原理^[2], 以CRH2动车组

收稿日期: 2010-08-09

基金项目: 自然科学基金资助项目(50905148)

拖车转向架作为对象,保持其原有制动装置(轴盘制动装置)不变。根据转向架现有位置空间,将涡流制动装置布置安装在2个轴盘的中间。旋转型永磁涡流制动装置的整体尺寸必须满足轴向尺寸并控制在550 mm之内,径向尺寸不超过轴盘的尺寸,即670 mm。

感应盘通过轴肩安装在车轴上,随车轴旋转,感应盘采用导磁和导电性能都良好的金属制成,一般选用不锈钢。磁场调整装置(包括有极片、磁轭、永磁体、驱动装置等)通过箱体安装在构架上。装置设置4对永磁体,相间30°,如图1所示。

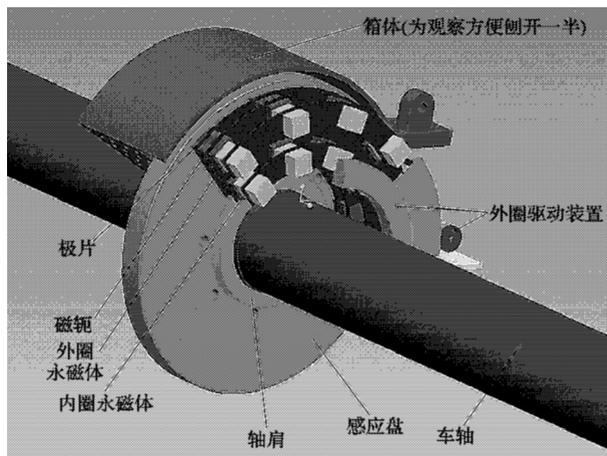


图1 旋转型永磁涡流制动装置的结构

极片采用导磁性能良好的坡莫合金制成。在列车正常运行的时候,也就是径向内、外圈磁体磁极相反的时候,磁通在极片内构成闭合回路,因此,磁场不通过感应盘,感应盘内也不产生涡流,即不产生制动力。而当制动机构工作时,外圈驱动机构使相邻内、外圈上两磁铁组的两磁极排列一致,于是磁通穿过极片在感应盘内通过,随着车轴旋转感应盘便会产生涡流,从而产生制动力。极片不能像感应盘一样做成一个连续整体,对应于每对磁体磁极相对独立。磁轭本身不产生磁场(磁力线),在磁路中只起磁力线传输的作用,约束感应线圈产生的磁力线向外散放,使磁力线束集中在感应线圈周围,以提高该机构的效率。永磁体的磁能大小可直接影响涡流效应,一般选用具有高磁能积、高矫顽力等特性的Nd-Fe-B稀土永磁体。

2 永磁涡流制动装置磁场分析

电磁场理论由一组麦克斯韦方程组描述,由4个定律组成,分别是安培环路定理、法拉第电磁感应定理、高斯电通定律(简称高斯定律)和高斯磁通定律^[3]。所有电磁场的研究都是基于这些理论展开的。

当研究对象为静态磁场时,电磁场对时间的导数为零。根据安培环路定律,磁场强度的H旋度等于电流的面密度矢量J,即

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

根据磁通的连续性定理,在磁场中磁感应强度B

的散度等于零,即

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

同时根据各向同性介质的磁场性质得

$$B = \mu H \quad (3)$$

根据矢量分析,可以推导出数值计算的电流刚度的公式^[3],写成3个分量的标量微分方程式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_x + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_x + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_x &= -J_x \mu \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_y &= -J_y \mu \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_z + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_z + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_z &= -J_z \mu \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

一般来说磁场的边界可以分为两类:

1 为第一类边界,满足条件为

$$A=0 \quad (5)$$

其物理意义表现为与某条磁力线重合的边界。

2 为第二类边界,满足条件为

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

其物理意义表现为所有的通过的磁力线均与边界垂直。式中n表示边界的外法向量。

由以上的分析可以得到求解磁场物理量的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_x + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_x + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_x &= -J_x \mu \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_y + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_y &= -J_y \mu \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} A_z + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_z + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_z &= -J_z \mu \\ \Gamma 1: A &= 0 \\ \Gamma 2: \frac{\partial A}{\partial n} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据以上的数学模型,在给定的求解区域下,即可求出磁势A随坐标(x, y, z)的变化规律。

ANSYS软件是目前磁场计算中常用的一种数值计算工具。进行磁场分析可分为静态磁场分析和添加了运动效应的瞬态分析。考虑到计算的便捷性及小角度变化分析的可行性,在永磁涡流静态磁场分析中一般使用三维节点法。静态时关于内外圈磁体不同旋转角度条件下磁场强度分布及其变化规律的研究内容在文献[2]中已进行过分析,因此下面集中进行瞬态分析。

3 瞬态分析及制动功率

在瞬态仿真分析过程中,要获取制动盘在不同速度情况下所提供的制动功率,由于涉及到带气隙的永磁体涡流效应和运动效应,需要采用三维棱边法来完成分析。

因此需建立周围流体模型, 以便边界条件正确施加。模型如图2所示, 图2(a)是制动装置的三维模型, 而图2(b)则为一个大的空气柱, 把制动装置包含在内, 通过重叠和粘合等操作, 使设计的制动装置包含于该空气柱中。

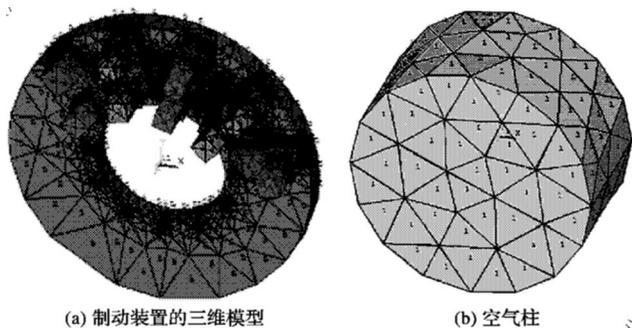


图 2 制动装置模型及网格划分

代入制动装置各部件的材料特性, 如表1所示。再添加速度效应, 即可得到在不同转速下, 感应盘所能提供的制动功率, 如表2和图3所示。可以看出, 随着速度增加, 制动功率也增加。在低速时(小于 50 km/h)制动功率衰减很快, 此时可像动力制动一样需要由空气制动来补充制动力的不足。

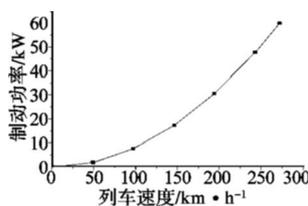


图 3 不同速度下的制动功率曲线

表 1 相关材料特性

项目	永磁体	磁轭	极片	感应盘	气隙
材料	Nd-Fe-B 稀土永磁体	坡莫合金	坡莫合金	硅钢片	空气
矫顽力 / A · m ⁻¹	7.6e5	—	—	—	—
相对导磁率 μ _r	1.068	1e5	1e5	10 000	1
电阻率 / Ω · m	—	—	—	4.4e-7	—

表 2 2 种工况下的制动功率

参数	列车速度 / km · h ⁻¹					
	49	97	146	194	243	272
制动状态制动功率 / W	1 914	7 760	17 232	30 638	47 879	60 064
非制动状态消耗功率 / W	2.99	11.95	26.89	47.80	74.70	93.72
2 种工况下的功率比值	0.16%	0.15%	0.16%	0.16%	0.16%	0.16%

在进行静态分析时, 在非制动状态几乎没有磁感线通过感应盘^[2]。但在采用三维棱边法进行瞬态分析的过程中, 发现在非制动状态下, 仍然存在着极为少量的涡流效应, 其对列车运行有微弱的影响, 该影响也是随着列车速度的增加而增加, 但其消耗的功率值很小, 如表2所示, 约为正常制动的0.16%, 可作为运行阻力来考虑。

上述现象主要是在静态分析过程当中, 假定制动装置是一个完全没有磁漏的理想磁路。而这在现实中, 这个假定无论如何是无法完全达到的。在瞬态分析中, 由于建立了一个极大的空气柱, 相比静态分析更为贴切地模拟了真实情况, 因此, 在分析中就会发现在非制动工作状态仍然存在微弱的功率消耗的情况。该消

耗功率很小, 就像在正常运行当中的摩擦力一样, 虽然无法完全避免, 但还是应该在可能的情况下尽力减小。

4 制动装置在非工作状态下对运行的影响

根据该永磁涡流制动装置的设计要素, 可以从以下几个方面来研究在列车正常运行状态下产生的制动功率大小, 以优化结构, 减少运行阻力。

4.1 磁极对数的影响

保持永磁体磁极间距和其他参数不变, 在转速为25 r/s(速度243 km/h)的运动状态下, 改变永磁体磁极对数, 得出非制动过程中制动装置产生的制动功率的大小, 如图4所示。

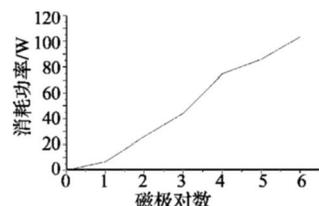


图 4 改变磁极对数的影响图

从图4中可以看出, 随着磁极对数的减少, 列车正常运行下, 制动装置产生的阻力功耗明显减少, 但磁极对数的减少又会削减永磁涡流制动装置在工作状态的制动效果。因此该方法应该慎重考虑。

4.2 磁极间周向距离的影响

保持永磁体磁极对数和其他参数不变, 在转速25 r/s(速度243 km/h)的运动状态下, 使磁极对数的周向距离从 20 ° ~60 ° 变化, 得到在非制动过程中制动阻力功耗, 如图5所示。

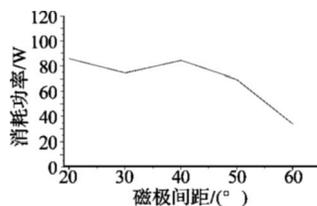


图 5 改磁极间周向距离的影响图

该曲线变化趋势与制动状态时制动功率随磁极间周向距离的变化趋势基本一致。也就是说若通过此方法来减小对运行中的影响, 就会影响制动过程中的制动功率。因此通过改变磁极间周向距离来减小制动机构对列车运行影响的方法不可取。

4.3 极片的厚度对装置非制动状态的影响

保持其他参数不变 在转速为25 r/s(速度243 km/h)的运动状态下, 使极片厚度在 30 ~80 mm 进行变化, 得到分析结果如图6所示。可以看出, 改变极片的厚度, 在 50 mm 之前, 非工作状态对运行的影响基本不变, 但对制动状态的制动功率影响很大^[2], 因此, 可以在 20~30 mm 范围内根据使用要求来调节极片厚度, 以达到在不影响制动能力的情况下尽量减小列车正常运行时该机构消耗的功率。

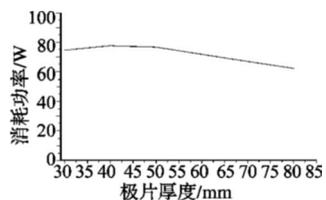


图 6 改变极片厚度的影响图

(下转第23页)

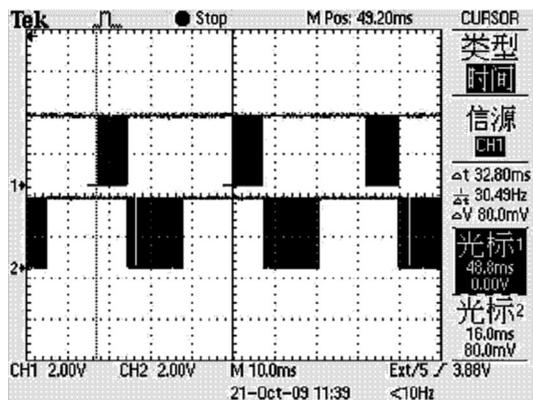


图 7 列车通信终端与 BCU 数据波形图

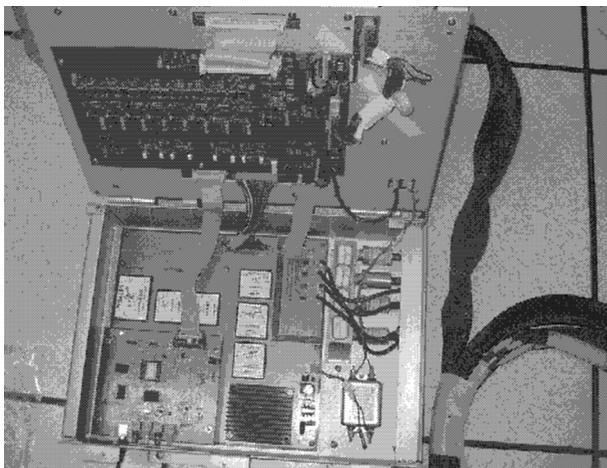


图 8 通信网关与国产 BCU 连接实物图

6 结束语

本文通过对 CRH2 型动车组列车控制终端与国产化 BCU 联网问题的分析, 设计了一种基于 FPGA 的 HDLC 协议与 RS485 协议通信网关, 同时给出了光纤通信模块以及 BCU 通信 IP 模块的设计方案, 最后经过列车通信终端与国产化 BCU 的通信试验, 验证了该通信网关性能可靠, 满足设计要求。

参考文献:

- [1] 内田清五. 日本新干线列车制动系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [2] 彭俊彬. 动车组牵引与制动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [3] 李兰英. Nios 嵌入式软核 SOPC 设计原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [4] 阳宪惠. 工业数据通信与控制网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] 张必英. 基于 FPGA 的 HDLC 协议控制器的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.

(上接第 19 页)

4.4 空隙宽度对装置非制动状态的影响

保持其他参数不变, 在转速为 25 r/s (列车速度 243 km/h) 的运动状态下, 使空隙宽度不断增加, 得到改变空隙宽度对阻力功耗的影响, 如图 7 所示。

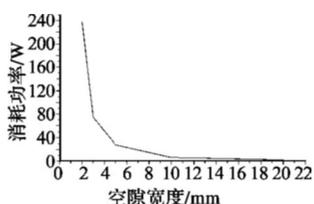


图 7 改变空隙宽度的影响图

可以看出, 随着空隙宽度的增加, 列车正常运行时该机构对消耗的功率不断减小, 根据这个变化趋势, 当空隙宽度增加到一定程度, 可以对该影响忽略不计。但考虑到随着空隙宽度增加, 在工作状态制动功率也会减小, 最好在 3 mm 左右。所以单纯采取增大空隙宽度不能改变该机构影响列车运行的情况。

5 结语

通过对旋转型永磁涡流制动装置的瞬态分析, 得

到了不同速度条件下的制动功率, 并对在非工作状态下制动装置 4 个带来阻力的方面进行了分析, 得出在设计永磁涡流制动装置时必须兼顾制动功率和非工作状态时的阻力。

参考文献:

- [1] 饶 忠. 列车制动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998: 6-8.
- [2] 蒋冬清, 杨 璨, 倪文波, 等. 基于 ANSYS 的永磁涡流制动机磁场分析[J]. 铁道机车车辆, 2009(5): 8-10.
- [3] 孙明礼, 胡仁喜, 崔海蓉, 等. ANSYS 10.0 电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 内田清五(日). 永磁涡流制动装置的基本特性[J]. 变流技术与电力牵引, 2001(4): 27-30.
- [5] 赵小波, 姬长英, 黄亦其, 等. 永磁式涡流缓速器涡流分析及制动力矩计算[J]. 机械设计, 2008(11): 62-65.
- [6] 蒋冬清. 旋转型永磁涡流制动装置的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [7] Gay S E. Analysis and experimental testing of a permanent magnet eddy-current brake[C]//Vehicle Power and Propulsion. 2005 IEEE Conference, 2005: 756-765.