

# 永磁减速装置结构对制动性能的影响分析\*

应之丁 陈家敏

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 副教授)

**摘要** 设计了一种应用于有轨电车的永磁减速装置。基于永磁体移位形成不同磁路的基本原理,产生不同的磁场与涡流作用条件,分析永磁减速装置制动性能,建立了结构仿真模型。通过优化永磁体磁极厚度、转盘厚度和永磁体内外半径尺寸等主要结构参数,进行提高制动力矩分析演算。为验证仿真模型的有效性,研制试验样机。将制动转矩仿真值与试验值进行对比,制动转矩误差在 5% 以内。

**关键词** 有轨电车; 涡流制动; 磁场分析

**中图分类号** U270.35

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.005

## Influence Analysis of the Permanent Magnet Reducer Structure on Braking Performance

YING Zhiding, CHEN Jiamin

**Abstract** A permanent magnet deceleration device applied to modern tram is designed. Based on the basic working principle of different magnetic circuits, different magnetic fields and eddy current action conditions generated by permanent magnet displacement, the braking performance of the permanent magnet deceleration device is analyzed, and a simulation model is established. Through optimizing the main structural parameters such as the thickness of the permanent magnet poles and the turntable, the inner and outer radius dimensions, an analytic calculus is conducted to improve the braking torque, and a test prototype is developed to verify the effectiveness of the simulation model. Finally, the brake torque simulation value is compared with the test value, it shows that the brake torque error is within 5%.

**Key words** tram; eddy current braking; magnetic analysis

**Author's address** Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

当前,有轨电车主要采用盘形制动。由于有轨电车在运行时频繁制动,使闸片过度磨耗,从而对列车安全运行产生隐患。此外,大量的检查、更换摩擦材料,也是有轨电车维保工作中的主要负担。

因此,有轨电车需要应用一种无磨耗的永磁减速装置。

在足够大功率的前提下,适用于有轨电车的永磁减速装置必须结构小巧,否则难以安装在空间狭小的转向架上。在建立永磁体磁场所需的基本组成前提下,本研究完成了工作状态的磁路设计,对永磁减速装置的结构参数和形成涡流场的物理参数进行了优化选择,并对作用场规范进行了调整。

永磁减速装置磁场的基本组成包括:永磁体、作为磁路连接的极片、感应涡流转盘等,以及调整永磁减速装置磁场和对涡流作用产生制动力矩的促动机构。

永磁减速装置应具备两种基本状态:① 永磁体磁极叠合,形成磁路在磁极内部循环的非工作状态。此时转盘上无磁场,没有制动力矩。② 永磁体磁极错开,形成磁路通过转盘循环的工作状态。此时磁场作用在旋转的转盘上,感应出涡旋流,涡旋流在磁场作用下产生涡流制动力矩。因此,建立永磁减速装置仿真模型,通过分析运动状态下的永磁体磁场强度变化和在转盘上产生的涡旋流分布,以及影响磁场的永磁体磁极厚度、气隙间隔、转盘厚度和永磁体内外半径尺寸等参数对制动力矩的影响,并提出结构参数优化方案。

## 1 永磁减速装置结构和仿真模型设立

根据有轨电车转向架安装条件和减速性能要求,在完成永磁减速装置两种基本状态的磁路设计基础上,进行磁场与涡流作用场的各结构参数的匹配设计,以及各物理参数耦合设计。

由于有轨电车频繁制动时在转盘上产生很大的涡流,转盘将积累大量热量并承受高强度载荷,因此,转盘采用具有高磁导率和低电阻率同时具有良好耐热性和机械性能的 12CrMoV 合金钢,并且转

\* 国家重点研发计划项目(2017YFB1201302-12B);“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFB1200602)

盘外侧设置散热筋。

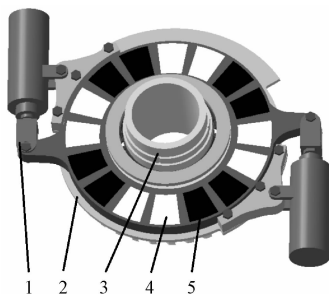
在永磁减速装置中,布置了8对永磁体磁极。考虑材料的性能、价格和加工难易等方面因素,选用钕铁硼永久磁铁,最大磁积能为  $318 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ,最高耐热温度为  $140^\circ\text{C}$ ,以保证在一定时间内持续减速工况下也能产生稳定的制动力矩。

调整永磁减速装置的液压促动机构,利用制动系统中液压回路的液压动力,推动永磁体安装架做圆周运动,改变极片和永磁体之间相对偏移,实现不同行程的圆周运动,使每块极片上实际参与制动作用的永磁体面积发生变化,改变进入转盘的磁通量,可以实现减速装置制动力大小的改变和通断。

所建立的永磁减速装置的结构模型如图1所示。图中包括上文所述的两种基本状态,永磁体磁极从叠合到错开排列方式,同一极片上的两块永磁体因极性相同不会形成回路,而是穿过气隙、转盘与相邻极片上的永磁体沿横向构成回路,有大量磁通穿过转盘,转盘上产生涡流进而产生制动力。

为判断装置结构和技术参数对制动力矩的影响,重点仿真计算磁场与涡流作用区域的磁场强度变化,对原结构模型进行针对性简化。以永磁减速装置完整的磁路组成结构为基础,将整体模型沿永磁体轴线方向对半分开,设定两对磁极,即只表现1/4个模型。图2为永磁减速装置简化模型,按顺

序由上至下分别为永磁体、极片、空气气隙和转盘。



注:1——促动机构;2——转盘;3——盘毂;4——永磁体;5——永磁体保持架

图1 永磁减速装置结构模型图

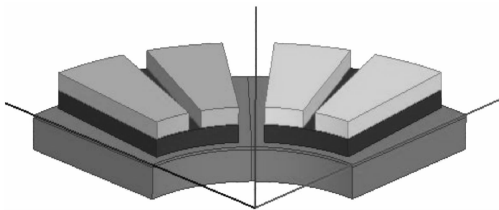


图2 永磁减速装置简化模型

旋转的转盘在永磁体磁场中切割磁力线,表面产生涡流,磁场作用旋转的涡流产生制动力矩<sup>[1]</sup>。计算制动力矩的方法主要有能量法和麦克斯韦张量法。根据能量法<sup>[2,4]</sup>,制动力矩可表示为:

$$T = \frac{4\sqrt{2}\pi^2 r^4 (\rho\mu_0 N_p)^{\frac{3}{2}} (H_c h)^2 \sqrt{\omega_n}}{\sqrt{u_r} \arcsin(r/2R) \left( 64\rho l_0 + \frac{\pi k_e r^2}{2\arcsin(r/2R)} \sqrt{\frac{\rho\mu_0 \omega_n}{N_p \mu_r}} \right)^2} \quad (1)$$

式中:

$\mu_r$ ——转盘相对磁导率;

$H_c$ ——永磁体的矫顽力;

$h$ ——永磁体沿励磁方向高度;

$R$ ——磁极圆心与车轴中心线间距;

$\omega_n$ ——转子盘角速度;

$N_p$ ——磁极对数;

$l_0$ ——气隙间距;

$\rho$ ——制动盘电阻率;

$k_e$ ——等效折算系数,  $k_e = 0.8 \sim 1.8$ ;

$\mu_0$ ——真空磁导率;

$r$ ——永磁体截面半径。

从式(1)可知,在永磁体的矫顽力  $H_c$  确定下,影响制动力矩除了各相关材料的理化参数,就是磁极对数、转速和结构尺寸参数等。因此,形成磁场

与涡流作用场的各结构参数的匹配和优化设计是研制永磁减速装置成功的关键。利用 Ansoft 分析得到工作状态下磁场分布矢量图,如图3所示。

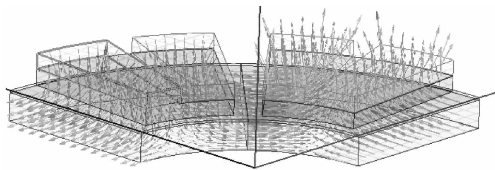


图3 制动状态磁场分布矢量图

对三维仿真模型进行仿真分析,制动力矩随时间变化曲线如图4所示。随着时间的推移,转盘的旋转运动逐渐进入稳态,制动转矩的波动程度也越来越小,并逐渐趋于平缓近似于一条直线,其值最后在  $630 \text{ N} \cdot \text{m}$  附近轻微波动。

由图5所示的制动功率随时间变化曲线可见,

制动功率曲线和制动力矩曲线基本在相同时刻开始稳定,在 68 kW 附近轻微波动。

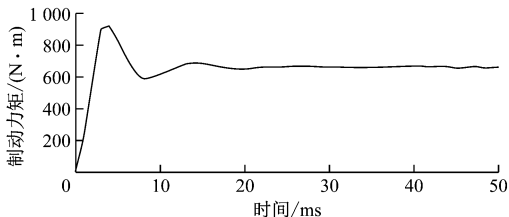


图4 仿真模型制动力矩随时间变化曲线

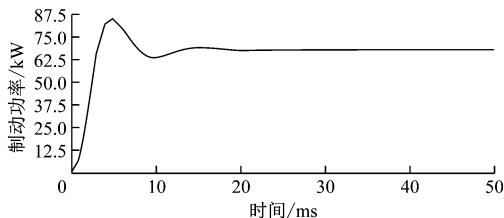


图5 仿真模型制动功率随时间变化曲线

## 2 永磁减速装置结构参数对制动性能的影响

在达到前述单盘最低扭矩条件下,减小永磁减速装置结构尺寸是核心目标。因此,在永磁体磁极厚度、气隙间隔、转盘厚度和扇形外径尺寸等多种结构参数方面进行优化分析。

### 2.1 永磁体磁极厚度优化

改变永磁体磁极厚度,得到永磁体磁极厚度与制动力矩曲线,如图6所示。由图可见,制动转矩与永磁体磁极厚度呈逐步上升关系,当磁极厚度从 37.5 mm 增大到 62.5 mm 时,制动力矩从 1 100 N·m 增大到 1 950 N·m。在初始阶段增加量较大,然后随着磁极厚度的不断增加而逐渐减小,有明显的饱和现象,这是由于软磁材料磁饱和而造成的。因此,在一定范围内增加激励源永磁体的磁极厚度可以显著提高制动力矩,在降低成本的同时能有效提高制动性能。改变永磁体磁极厚度,从

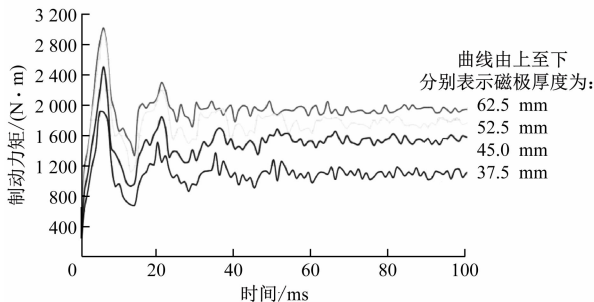


图6 不同永磁体磁极厚度对制动力矩影响规律

37.5 mm 提高到 45.0 mm,制动力矩可以提高 36%。

### 2.2 气隙间隔优化

由图7所示的不同气隙间隔对制动力矩的影响规律可见:在励磁气隙由 3.00 mm 减小到 0.75 mm 的过程中,制动力矩由 850 N·m 逐渐增大为 1 600 N·m。这是由于气隙减小将使磁场密度交变分量增加,从而增大制动力矩。但气隙间隔由 0.75 mm 继续减小的过程中,制动力矩基本没有增加,说明磁场已进入饱和区域。因此,在一定范围内可以通过减小气隙间隔的方式增大制动转矩,但是气隙的变化对制动力矩的影响程度小于磁极厚度的影响程度。考虑机加工、装配精度、转盘受热膨胀等因素,气隙一般不宜小于 1 mm。改变气隙间隔,从 2 mm 降到 1 mm,制动力矩可以提高 17%。

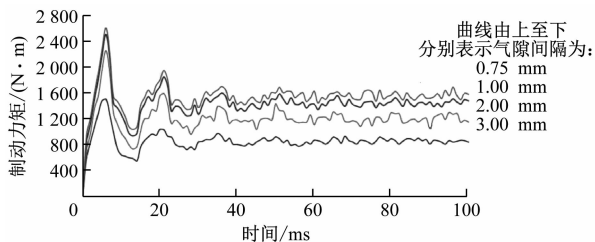


图7 不同气隙间隔对制动力矩影响规律

### 2.3 转盘厚度优化

图8为保持模型其他参数不变,转盘厚度与制动力矩曲线。当转盘的厚度从 16 mm 增加到 22 mm 时,制动转矩从 1 200 N·m 增加到 1 800 N·m,制动转矩随转盘厚度的增加而逐步增加,但增加的幅度逐渐下降。转盘厚度增加会使整个减速装置重量的增加,改变转盘厚度,从 20 mm 提高到 22 mm,制动力矩可以提高 6%。

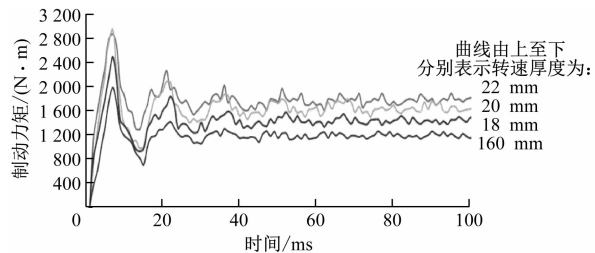


图8 不同转盘厚度对制动力矩影响规律

### 2.4 永磁体扇形外径尺寸优化

设置永磁体扇形外径尺寸,计算与之对应的制动力矩曲线。当永磁体外圆弧半径从 260 mm 增加到 320 mm 时,制动转矩从 1 500 N·m 增加到 3 100 N·m,制动转矩明显增长且增幅在逐渐增

加,如图9所示。因此,可以通过增大永磁体外径尺寸来提高制动转矩,但制动器的径向尺寸受到轮对直径尺寸的限制,应用于有轨电车的永磁减速装置尺寸最多达到直径540 mm,而铁路车辆的轮径一般达到800~915 mm,因此,将来可以考虑将大尺寸的永磁减速装置应用于轮径更大的车辆上。改变永磁体扇形外径尺寸,从260 mm提高到280 mm,制动力矩可以提高26%。

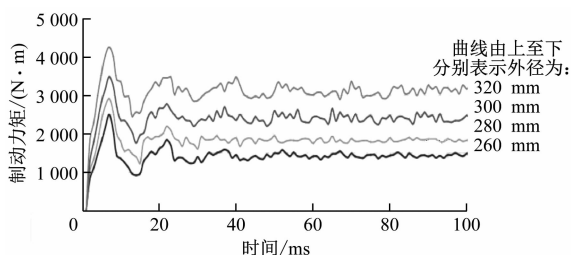


图9 不同磁体扇形外径尺寸对制动力矩影响规律

### 3 永磁减速装置试验

永磁减速装置试验系统(图10)由电控系统、传动装置、扭力转速传感器、涡流制动样机等主要部件组成。持续制动性能试验,利用电机带动与转轴相连的永磁减速装置转子旋转,装置通过涡流损耗吸收这部分能量;通过扭力转速传感器测定转速和制动力矩,转子温度通过红外温度传感器进行测量。



图10 永磁减速装置台式试验系统

如图11所示,在0~1 min内,制动力矩维持在628 N·m左右,1 min后制动力矩开始缓慢下降。分析下降的原因:测试转盘温升较高,已有明显的退磁效应;当转盘达到105℃时接近饱和,散热平衡稳定,制动力矩不再下降。考虑到列车具有较高的速度,散热速度较快,试验台初始制动力矩更加接近实际制动力矩。这一数值与仿真结果比较接近,误差小于5%。仿真结果与试验结果基本保持一致,证明所建立的永磁减速装置模型基本符合实际电磁场作用关系,所提出的优化设计参数有参考价值。

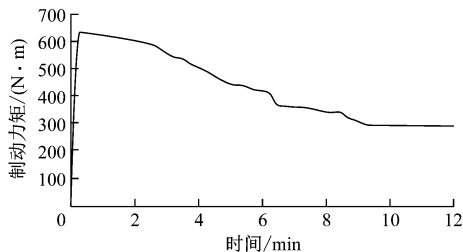


图11 永磁减速装置试验台制动力矩随时间变化曲线

图12为制动功率随时间变化曲线。在0~1 min内,制动功率维持在63.28 kW左右,实验结果与仿真结果比较接近,误差小于7.5%,在较小的误差范围内,仿真模型正确。

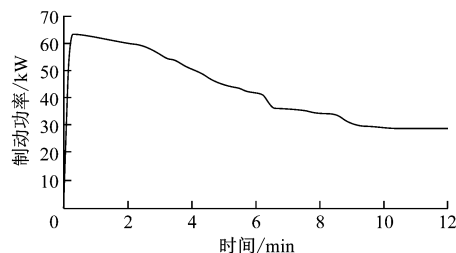


图12 永磁减速装置试验台制动功率随时间变化曲线

### 4 结论

在一定范围内增加永磁体的磁极厚度和转盘厚度可以提高制动力矩。考虑到结构尺寸限制,磁极厚度不应超过60 mm。转盘厚度的增加会增加装置质量,因此转盘厚度不应过分增加。制动性能对气隙间隔反应灵敏,但受机械加工精度限制,气隙不宜小于1 mm。增加永磁体内外半径尺寸将显著增加制动力矩,可以考虑将大尺寸的永磁减速装置应用于轮径更大的货车上。将仿真值与永磁减速装置台式试验装置试验值进行对比,两者在较小的误差范围内保证了仿真模型的可信性。

### 参考文献

- [1] 应之丁,林建平. 列车涡流制动机理及制动力矩模型[M]. 上海:同济大学出版社,2014.
- [2] 何仁,赵万忠,牛润新. 车用永磁式缓速器制动力矩的计算方法[J]. 交通运输工程学报,2006(4):62.
- [3] 孙为民,张跃明,吴兵波. 电涡流缓速器制动力矩计算的新方法[J]. 现代机械,2005(4):21.
- [4] 衣丰艳,徐刚,于明进,等. 发动机电涡流缓速器制动力矩的计算[J]. 机械设计与研究,2009(4):40.

(收稿日期:2017-12-12)