

# 不同永磁电机对轨道交通直驱永磁牵引控制系统的影响<sup>\*</sup>

詹哲军 孙德强 张吉斌 路 瑶

(中车永济电机有限公司技术中心, 710016, 西安 // 第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 为深入研究不同永磁体对大功率直驱永磁牵引控制系统控制特性的影响, 设计了钕钴和钕铁硼两种永磁电机。讨论了这两种永磁电机的特性及基本控制策略, 在此基础上对两种永磁电机进行了分析, 通过联调试验验证了该系统的稳定性和可靠性。

**关键词** 轨道交通车辆; 永磁电机; 直驱永磁牵引控制系统

**中图分类号** TM351; TM922.71

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.018

## Influence of Different Permanent Magnet Motors on Rail Transit Direct-drive Permanent Magnet Traction Control System

ZHAN Zhejun, SUN Deqiang, ZHANG Jibin, LU Yao

**Abstract** To study the influence of different permanent magnets on the control characteristics of high-power direct-drive permanent magnet traction control system, two types of permanent magnet motors are designed, that are samarium-cobalt and rubidium-iron-boron. The characteristics and basic control strategies of both permanent magnet motors are discussed, on the basis of which, both permanent magnet motors are analyzed in depth. Stability and reliability of the system are verified by connection and coordination tests.

**Key words** rail transit vehicle; permanent magnet motor; direct-drive permanent traction control system

**Author's address** Technical Center, CRRC Yongji Railway Vehicles Co., Ltd., 710016, Xi'an, China

20 世纪 90 年代开始, 国外就开展了对小功率永磁直驱同步牵引系统的研究, 其中, 以日本 JR 公司、德国 Siemens 公司、捷克 Skoda 公司为代表。国内轨道交通领域关于永磁直驱电机的研究及应用还处于起步阶段, 尤其是采用大功率永磁直驱技术

的铁路机车还处于空白状态。2017 年, 中车永济电机有限公司承接了中国铁路总公司项目《客运电力机车直驱永磁牵引控制系统研制》。为了深入研究不同永磁体对大功率直驱永磁牵引系统特性的影响, 该项目设计了钕钴和钕铁硼两种不同材料永磁体的电机, 通过半实物仿真和地面试验验证, 对两种永磁电机的效率、功率因数及温升等性能进行了对比分析, 同时还针对大功率永磁电机的 MTPA (最大转矩电流比) 控制及弱磁控制进行了深入研究。该研究通过大量试验验证了技术方案的可行性, 且两种电机完全满足客运电力机车的要求。研究成果可为直驱永磁系统在电力机车行业的应用积累大量的数据和经验<sup>[1-3]</sup>。

## 1 直驱永磁牵引控制系统简介

本文设计的直驱永磁牵引控制系统, 装于速度为 160 km/h 的客运电力机车上。该系统中, 共有 6 个电机分别安装于两个转向架上, 每个电机均采用独立轴控模式。为了对比分析不同永磁体电机对牵引控制系统的影响, 本项目设计了钕钴和钕铁硼两种材料的永磁电机, 各 3 台。分别在两个转向架上安装钕钴永磁体电机和钕铁硼永磁电机, 电机采用悬架安装方式, 通过空心轴和挠性板直接驱动轮对, 省去了齿轮箱, 提升了系统可靠性, 降低了维修维护成本。

图 1 为客运电力机车的牵引特性曲线。图 1 中, 客运电力机车的起动牵引力要求大于 420 kN, 且持续牵引力大于 324 kN; 最大再生制动力位于车钩处, 为 225 kN。图 2 为客运电力机车的制动特性曲线。图 2 中, 最大再生制动力开始线性下降时的车速  $\leq 15$  km/h, 再生制动力线性下降至 0 时的车速  $\leq 5$  km/h。

<sup>\*</sup> 中国铁路总公司科技研究开发计划项目 (2017J009-F)

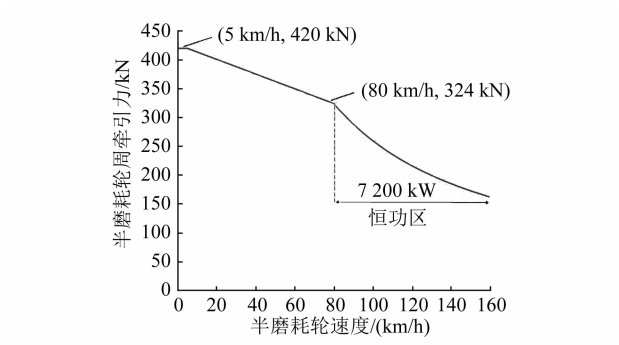


图1 客运电力机车的牵引特性曲线

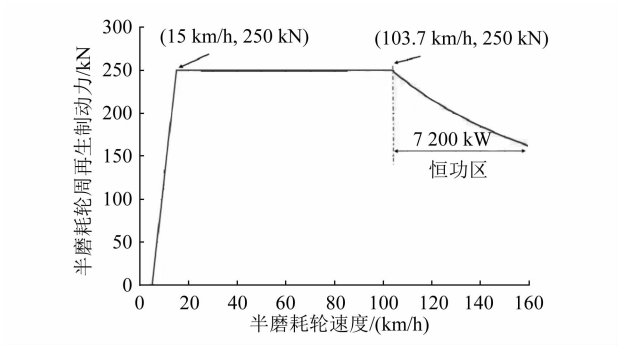


图2 客运电力机车的制动特性曲线

磁路结构,挡板及挡板压圈采用不锈钢材料,永磁体采用钕铁硼材料,磁钢槽采用硅橡胶灌封。

表 1 直驱永磁电机设计参数	
参数	取值
额定功率/kW	1 225
额定电压/V	1 660
额定电流/A	477.7
额定频率/Hz	41.2
恒功转速/(r/min)	450~706
额定转矩/(Nm)	32 416
功率因数	0.93
额定效率/%	95.6
极数/极	14

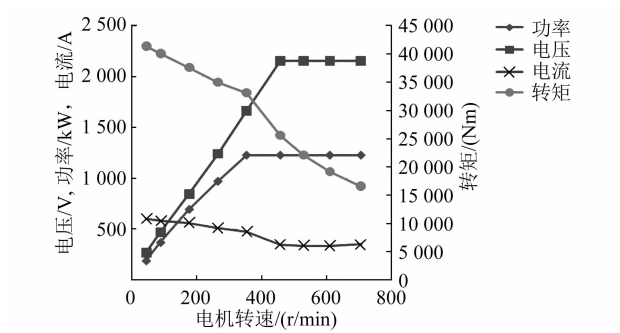


图3 直驱永磁电机特性曲线

## 2 直驱永磁牵引控制系统设计

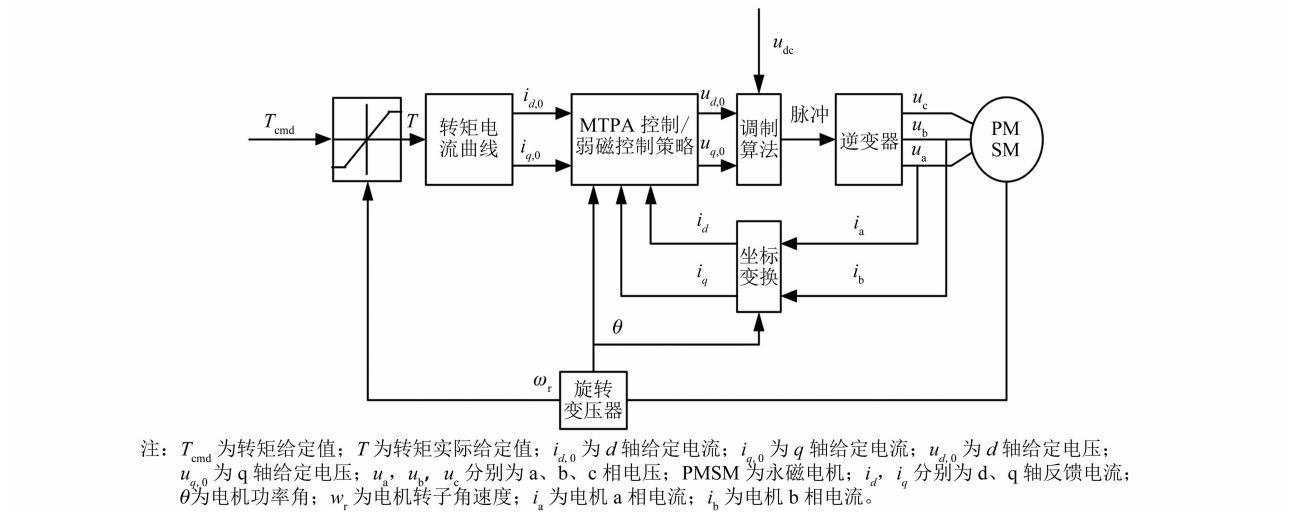
### 2.1 直驱永磁电机设计

直驱永磁电机相关设计参数如表 1 所示。直驱永磁电机特性曲线如图 3 所示。

直驱永磁电机定子采用成熟绝缘结构,真空压力浸漆。机座采用全叠片焊接结构,两端压圈、拉板,安装部分均采用铸造结构。定子铁心采用斜槽设计,机座外圆处留有通风道。电机转子采用 V 形

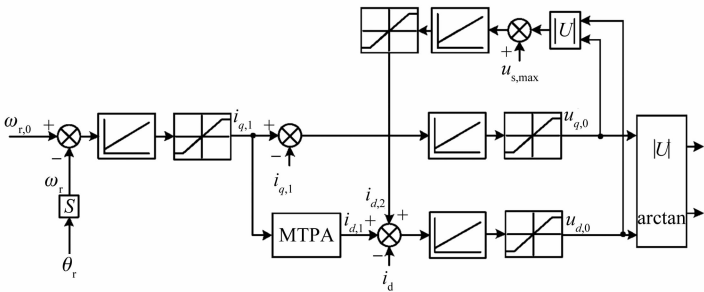
### 2.2 直驱永磁电机控制策略

直驱永磁同步电机在其额定转速下采用基于 MTPA 的矢量控制策略,即前馈电压和 PI(比例积分)调节器相结合的电压生成模式,见图 4。在额定转速以上采用单电流控制策略,输出的电压幅值达到饱和后而不再变化,并通过控制输出电压和反电势的功角来调整牵引和制动转矩,采用 Q 轴电流解耦项对转矩精度进行校准<sup>[4]</sup>,见图 5。



注:  $T_{cmd}$  为转矩给定值;  $T$  为转矩实际给定值;  $i_{d,0}$  为 d 轴给定电流;  $i_{q,0}$  为 q 轴给定电流;  $u_{d,0}$  为 d 轴给定电压;  $u_{q,0}$  为 q 轴给定电压;  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  分别为 a、b、c 相电压; PMSM 为永磁电机;  $i_d$ ,  $i_q$  分别为 d、q 轴反馈电流;  $\theta$  为电机功率角;  $\omega_r$  为电机转子角速度;  $i_a$  为电机 a 相电流;  $i_b$  为电机 b 相电流。

图4 直驱永磁电机矢量控制框图



注： $\omega_{r,0}$  为给定转速； $\theta_r$  为反馈转速； $u_{s,max}$  为输出电压最大值； $\arctan$  为进行极坐标变换； $|U|$  为输出电压有效值； $i_{d,1}$  为  $d$  轴电流给定值； $i_{d,2}$  为  $d$  轴弱磁电流； $S$  为取微分。

图 5 直驱永磁电机弱磁控制框图

2.3 直驱永磁电机脉冲调制策略

根据电力机车散热系统要求,功率模块最高开关频率不能超过 450 Hz。为保证电机电压、电流波形的正弦对称,尽量减小低次谐波的影响。本项目采用多模式 PWM (脉冲宽度调制)策略,一方面可以充分利用逆变器的允许开关频率,另一方面保证进入弱磁区后能有较高的直流电压利用率<sup>[5]</sup>。

多模式 PWM 策略为:电机启动时采用异步调制 PWM,当调制波频率为 20 Hz 时切换到 15 分频同步调制;当调制波频率为 30 Hz 时切换到 12 分频,然后切换到中间 60°调制模式;在 7 分频和 3 分频的切换点采用 2 Hz 的滞环,避免频繁切换引起振荡;最后根据频率和电压利用率判断是否进入方波调制。多模式 PWM 策略见图 6。

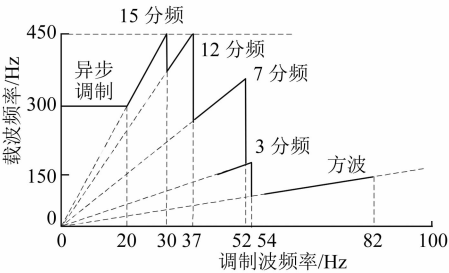


图 6 直驱永磁电机多模式 PWM 调制策略

3 永磁体材料对直驱永磁牵引控制系统的影响

3.1 两种永磁体材料特性对比分析

钕钴永磁体以其较高的温度系数在很多高温环境得到推广应用,但该永磁体材质较脆,对安装和工艺都提出了较高的要求。相比而言,钕铁硼永磁体磁能密度更优,价格便宜,但耐高温性能较差。本次设计的电机定子最高工作温度为 200 ℃,正常工作范围内,钕钴和钕铁硼两种永磁体都不会发生

因温度过高而产生的失磁。为了深入研究两种永磁体对直驱永磁牵引控制系统的影响,本次设计同时采用钕钴 (SmCo30H) 和钕铁硼 (N38EH) 两种永磁体材料,通过试验对其性能进行对比分析。两种永磁体的特性见表 2。

表 2 两种永磁体材料特性对比

永磁体材料	最大磁能积/(kJ/m <sup>3</sup> )	最高工作温度/℃	衰减温度系数/(%/℃)	150 ℃时的剩磁/T
SmCo30H	239	350	-0.03	1.038
N38EH	287	200	-0.12	1.030

3.2 两种永磁体电机损耗对比分析

电机损耗主要包含铜耗、铁耗和机械损耗等。本次设计的两种永磁体电机机械结构尺寸完全一致,因此,电机损耗主要表现为铜耗和铁耗等的差异。

电机铜耗  $p_{cu}$  和铁耗  $p_c$  的公式如下:

$$p_{cu} = r_s i_s^2 \tag{1}$$

$$p_c = p_h + p_e = k_h f b_m^2 + k_e f^2 b_m^2 \tag{2}$$

式中:

- $r_s$ ——定子电阻值;
- $i_s$ ——定子电流;
- $p_h, p_e$ ——磁滞损耗和涡流损耗;
- $k_h, k_e$ ——磁滞损耗和涡流损耗系数;
- $b_m$ ——磁通密度峰值;
- $f$ ——电机供电频率。

由于永磁体磁钢的磁场强度随温度线性变化,为保证直驱永磁牵引控制系统长时间工作的稳定性,选择两种永磁体磁钢,且保证其在 150℃时的磁场强度一致。针对永磁体磁钢磁场强度随温度的变化,在定子侧埋设温度传感器,通过算法进行补偿。

两种永磁电机损耗对比如表 3 所示。由表 3 可

知,在 30 ℃时,钕铁硼永磁体的磁链和铁耗均较大,但由于其输出电压较高,且电流较小,导致铜耗较低,因此,与钕钴永磁体相比,钕铁硼永磁体的整体效率要稍高。

表 3 两种永磁电机损耗对比

名称	磁链/Wb	铁损/kW	其他损耗/kW	效率/%
钕钴永磁体	5.01	5.5	36.5	96.5
钕铁硼永磁体	5.57	7.5	28.5	97.0

### 3.3 两种永磁电机功率因数、效率对比分析

因两种永磁体在 150 ℃时永磁体磁钢磁场一致,故当电机温度低于该温度时,由于磁钢磁场强度的差异,导致两种永磁体电机在效率和功率因数上存在差异。当电机温度在 90℃时,钕钴电机的磁链幅值为 4.9 Wb,钕铁硼电机的磁链幅值为 5.12 Wb。

反电势  $e$  的计算公式为:

$$e = \omega \psi \tag{3}$$

式中:

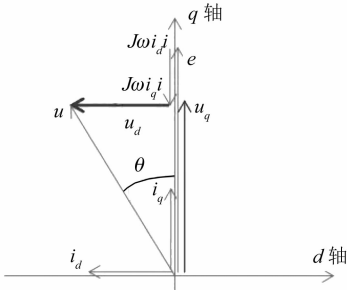
- $\omega$ ——电机角速度;
- $\psi$ ——电机磁链。

由式(3)可知,此时钕钴电机的反电势较钕铁硼电机要低。为保持电机的外特性一致,即要输出相同的转矩和功率,钕钴电机此时需要的电流要大于钕铁硼电机。由式(1)和图 7 可知,磁链幅值及  $d$  轴、 $q$  轴电流决定了输出电压幅值和空间相位。为了使钕钴电机达到和钕铁硼一样的输出转矩,必须增大  $q$  轴电流,这样直接增大了输出电压  $u_s$  和  $i_s$  的夹角,降低了功率因数,同时由于电流的增大也导致了铜耗的增加。

$$\begin{aligned} u_d &= r_s i_d - \omega l_q i_q \\ u_q &= r_s i_q + \omega l_d i_d + \omega \psi \end{aligned} \tag{4}$$

式中:

$u_d$ —— $d$  轴电压;



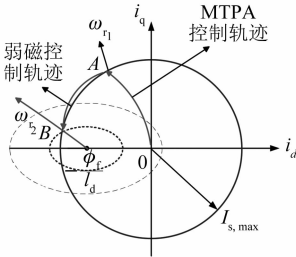
注:  $e$  为永磁电机反电势;  $J$  为空间矢量常用量;  $i$  为电流。

图 7 永磁电机控制矢量图

- $u_q$ —— $q$  轴电压;
- $l_q$ —— $d$  轴电感;
- $l_d$ —— $q$  轴电感。

### 3.4 弱磁控制研究

根据电力机车运营工况需求,本次设计的直驱永磁电机的恒功转速范围为 450 ~ 706 r/min,弱磁范围约为 1 倍额定转速,其控制策略按图 8 中的 MTPA 曲线  $OA$  和弱磁曲线  $AB$  执行。当电机在 MTPA 模式下运行时,按图 1 所示进行控制输出  $d$  轴和  $q$  轴电压;当进入弱磁模式时,按图 2 进行控制,即根据电机反电势和母线电压进行调节输出弱磁电流  $\Delta i_d$ ,以抑制反电势。



注:  $\omega_{r1}$  为低速区转速上升轨迹;  $\omega_{d2}$  为弱磁区转速上升轨迹;  $I_{s, \max}$  为电流极限;  $\phi_f$  为转子磁通。

图 8 MTPA 曲线及弱磁轨迹

当温度低于 150 ℃时,两种永磁体磁链幅值的差异导致电机反电势产生差异。因此,在直驱永磁牵引控制系统中,不能只根据电机的恒压恒功点来确定电机控制是进入单电流弱磁模式,还是调制进入弱磁模式,而要实时结合电机的输出电压一起进行判断,即通过  $\sqrt{u_d^2 + u_q^2} \geq 2u_{dc}/\pi$  ( $u_{dc}$  为母线电压) 来判断系统的运行模式。

## 4 直驱永磁牵引控制系统联调试验验证

永磁电机样机试制完成后,按试验大纲要求进行牵引控制系统的联调试验。

### 4.1 扫频试验

在全速度范围内进行了扫频试验(见图 9),得到不同电机扭矩下永磁电机转矩特性对比曲线,如图 10 所示。由图 9 ~ 10 可知,在不同调制模式下,各次载波切换平稳;不同电机扭矩下转矩输出精度为 100% ~ 105%,满足设计要求。

### 4.2 两种永磁电机输出电压、效率及功率因数对比试验

图 11 为两种永磁电机输出电压对比曲线。由图 11 可知,在电机温度试验刚开始时,钕钴电机的

电压明显低于钕铁硼电机,随着试验进行,铁芯温度逐步升高,两个电机的电压也逐渐接近。

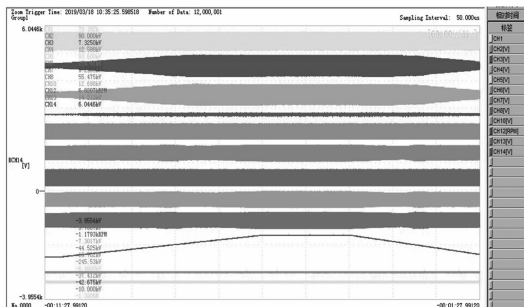


图9 扫频试验截屏图

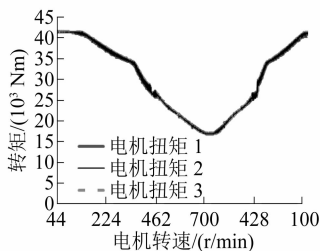


图10 不同电机扭矩下永磁电机转矩特性对比曲线

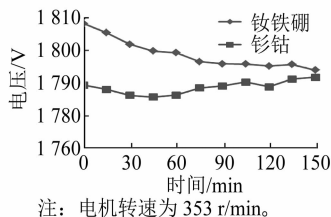
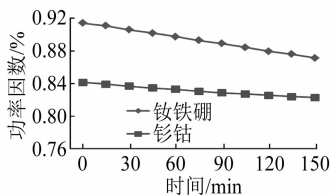


图11 两种永磁电机输出电压对比曲线

图12为两种永磁电机功率因数对比曲线。图13为两种永磁电机效率对比曲线。由图12~13可知,试验结果和上述理论分析完全一致。

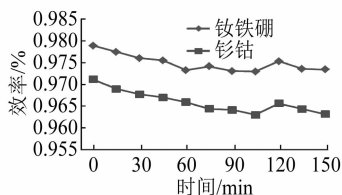
## 5 结语

直驱永磁牵引控制系统现已完成地面联调试



注:电机转速为353 r/min。

图12 两种永磁电机功率因数对比曲线



注:电机转速为353 r/min。

图13 两种永磁电机效率对比曲线

验,通过试验数据的对比分析,试验结论和前期理论分析结果完全一致。本次设计的两种永磁电机均满足系统要求,但各有优缺点。未来还需对这两种永磁体进行装车运营考核试验,以及在振动、高寒、湿热、网压突变及波动等不同的运营环境下对永磁体进行进一步考核,积累经验,为后续产品的市场化打好基础。

## 参考文献

- [1] 王渤洪. 日本铁路机车车辆传动用永磁同步电动机的研发概况[J]. 机车电传动, 2007(5): 41.
- [2] 王健. 地铁车辆用永磁直驱同步牵引电动机冷却结构设计[J]. 机车电传动, 2016(4): 6.
- [3] 冯江华. 高速动车组永磁同步牵引系统的研制[J]. 机车电传动, 2016(4): 1.
- [4] 周明磊, 李强, 游小杰, 等. 方波工况下牵引电机参数不准对矢量控制性能的影响[J]. 电机与控制学报, 2014(2): 42.
- [5] 周明磊, 游小杰, 王琛琛. 电力机车牵引传动系统矢量控制[J]. 电工技术学报, 2011(9): 110.

(收稿日期:2019-06-14)

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址: [tougao.umat1998.com](http://tougao.umat1998.com)