

# 直驱永磁牵引电机振动原因分析\*

吴楠 迟连强 李嘉宾 倪伟 张江涛

(中车永济电机有限公司, 710016, 西安//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 目的:与传统的异步电机相比,直驱永磁传动可省掉齿轮传动装置,提高传动效率,减小传动机构维护工作量,并提高传动系统整体效能。为解决直驱永磁牵引电机低速运行时振动加剧的问题,提高直驱永磁牵引电机服役寿命及安全性与舒适性,特开展本研究。方法:针对直驱永磁牵引电机在 90~105 r/min 转速范围内出现的振动加剧问题,根据永磁电机振动机理通过解析法分析了直驱永磁牵引电机极槽配合与电机径向电磁力之间的数值关系;使用 SKF-AX 型数据采集器对直驱永磁牵引电机传动端与非传动端及不同方向进行振动加速度检测,并对振动结果进行频谱分析,找到引起振动的频段;通过有限元方法对直驱永磁牵引电机进行径向力分析,对定子铁心模态进行分析,得到径向力的幅值、频率以及定子铁心自振频率。结果及结论:结合解析法、振动检测试验及有限元仿真分析证明该电机在 90~105 r/min 转速范围内发生共振是引起振动加剧的根本原因;并基于以上分析对该电机的极槽配合进行了改进,将电机 14 极 114 槽更改为 14 极 126 槽。通过有限元仿真分析及振动检测试验可知,已有效解决了电机在 90~105 r/min 出现的共振问题,提高了直驱永磁电力机车的安全性及舒适性。

**关键词** 直驱永磁牵引同步电机;振动;径向电磁力;有限元分析

中图分类号 TM351

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.025

## Cause Analysis of Direct-drive Permanent Magnet Traction Motor Vibration

WU Nan, CHI Lianqiang, LI Jiabin, NI Wei, ZHANG Jiangtao

**Abstract** Objective: Compared to conventional asynchronous motors, the DPM (direct-drive permanent magnet) transmission eliminates the need for gear transmission device, improving transmission efficiency, reducing maintenance workload on transmission mechanisms, and enhancing the overall efficiency of the transmission system. To address the issue of increased vibration during low-speed operation of DPM traction motors, it is aimed to improve the service life, safety, and

comfort of these motors from conducting this specific research.

**Method:** Focusing on the intensified vibrations observed in the 90 to 105 r/min rotation speed range of DPM traction motors, according to the vibration mechanism of permanent magnetic motors, an analytical approach is employed to investigate the numerical relationship between slot matching in the motor poles and the motor radial electromagnetic force of the DPM traction motor. The SKF-AX data collector is utilized to measure vibration acceleration at the transmission and non-transmission ends of the DPM traction motor and in different directions. Spectral analysis is conducted on the vibration results to identify the frequency range causing the vibration. Finite element analysis is employed to analyze the radial force in the DPM traction motor and assess the modal characteristics of the stator core, obtaining the amplitude, frequency, and natural frequency of the stator core. **Result & Conclusion:** The combined use of analytical method, vibration detection tests, and finite element simulation analysis demonstrates that resonance in the 90 to 105 r/min rotation speed range is the root cause of the intensified vibration. Based on this analyses, the motor pole matching is improved by changing the configuration from 14-pole, 114-slot to 14-pole, 126-slot. Finite element simulation analysis and vibration detection tests confirm the effective resolution of resonance issue in the 90 to 105 r/m speed range, thereby enhancing the safety and comfort of DPM electric locomotives.

**Key words** direct-drive permanent magnet traction synchronous motor; vibration; radial electromagnetic force; finite element analysis

**Author's address** CRRC Yongji Electric Co., Ltd., 710016, Xi'an, China

与传统的异步电机相比,永磁牵引电机在效率、功率密度以及机械特性等方面更具优势<sup>[1-2]</sup>。目前,我国大功率机车通常采用异步传动系统,齿轮箱等装置会导致传动效率下降,直驱永磁传动系统可以省掉齿轮传动装置,提高传动效率,减少传

\* 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2017J009-F)

动机机构维护工作量,可提高传动系统整体效能<sup>[3]</sup>。现今电机行业不仅对电机工作性能要求较高,电机的振动噪声也成为评价电机性能优劣的重要标准<sup>[4]</sup>。电机的振动不仅影响机车运行的舒适性,且过度的振动会对整个机电传动系统造成影响。因此,如何快速确定永磁牵引同步电机振动的根源,并有效抑制永磁牵引同步电机的振动,对直驱永磁牵引电机在我国铁路机车上的应用具有重要的意义。

本研究从一台新造直驱永磁牵引电机在空载工况下,在 90 ~ 105 r/min 转速范围内出现的异音和振动加剧的问题入手,先对电机振动的机理进行研究,再通过试验与仿真的方法确定异音和振动加剧的根源,并提出了有效的改进措施。

## 1 径向电磁力研究

永磁牵引同步电机气隙磁场相互作用会产生随时间和空间变化的电磁力波,包括径向电磁力和切向电磁力。其中,径向电磁力会使电机铁心发生周期性的形变引起振动,是电磁振动和噪声的主要来源<sup>[5]</sup>。本节将对永磁牵引同步电机在空载工况下的径向电磁力进行分析。

永磁牵引同步电机空载运行下,气隙磁场主要由永磁体产生,其空载气隙磁动势  $f(\theta, \tau)$  为:

$$f(\theta, t) = \sum_{\mu} F_{\mu} \cos(\mu\theta - \mu\omega_1 t/p) \quad (1)$$

式中:

$F_{\mu}$ —— $\mu$  阶磁动势波幅值;

$\theta$ ——空间角度;

$t$ ——时间;

$\omega_1$ ——电流基波频率;

$p$ ——电机极对数;

$\mu$ ——磁动势空间阶数,  $\mu = (2r+1)p, r=0, 1, 2, \dots$ 。

气隙磁密的表达式为:

$$b(\theta, t) = f(\theta, t) \lambda(\theta, t) \quad (2)$$

式中:

$b(\theta, t)$ ——气隙磁密;

$\lambda(\theta, t)$ ——气隙比磁密。

将式(1)和式(2)代入式(3),得到永磁牵引同步电机空载运行时的径向气隙磁密:

$$b_r(\theta, t) = \sum_{\mu} B_{\mu} \Lambda_0^* \cos(\mu\theta - \mu\omega_1 t/p) +$$

$$\sum_{\mu} \sum_l \frac{B_{\mu} \Lambda_l^*}{2} \cos((\mu \pm lz)\theta - \mu\omega_1 t/p) \quad (3)$$

式中:

$l$ ——常数,  $l=1, 2, 3, \dots$ ;

$z$ ——定子槽数;

$\Lambda_0^*$ ——气隙平均比磁导;

$\Lambda_l^*$ ——第  $l$  次谐波平均比磁导。

根据麦克斯韦张量方程,径向电磁力  $P(\theta, t)$  的计算公式为:

$$P(\theta, t) = \frac{b_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (4)$$

式中:

$\mu_0$ ——真空磁导率。

实践表明,空载时转子主极磁场  $\nu$  次谐波与转子主波引起的一阶齿谐波(极对数为  $\nu \pm Z$ , 频率为  $\omega_1$ )相互作用是引起空载电磁振动噪声的主要根源。二者相互作用产生的径向力波为:

$$P(\theta, t) = \sum_{\nu} \frac{B_{\nu} B_p \Lambda_0^* \Lambda_1^*}{2\mu_0} \cos((\nu \pm p \pm Z)\theta - (\nu \pm p)\omega_1 t/p) \quad (5)$$

式中:

$B_p$ ——转子主波磁场磁通密度。

定子铁心的变形量约与力波次数的四次方成反比,一般径向电磁力波的阶数大于 4 时,可不考虑,所以本研究仅考虑小于 4 阶的电磁力波。

当仅考虑低阶次力波时,可得到力波阶次的表达式为:

$$\gamma = \begin{cases} (2r+1)p + (p-Z) = 2(r+1)p - Z \\ (2r+1)p - (p+Z) = 2rp - Z \end{cases} \quad (6)$$

对应的力波频率为  $f=2rf_0$ ,  $f_0$  为电源频率。

通过分析得知:当  $r$  或  $(r+1)$  与  $Z/2p$  值最接近时,转子主极磁场  $\nu$  次谐波与一阶齿谐波所产生的电磁力最容易导致永磁牵引同步电机在空载下产生振动。

本研究的直驱永磁牵引电机的极数为 14, 槽数为 114, 当  $r=7$  或  $r=8$  时,根据式(6)可以得出电机在空载工况下存在 2 阶径向电磁力,径向电磁力的频率为 186.6 Hz。

通过分析可以发现,本研究的直驱永磁牵引电机在空载工况条件下含有 2 阶径向电磁力,增大了电机的振动,初步证明本电机的极槽配合选取存在

问题。

2 振动检测与频谱分析

分析了直驱永磁电机在空载工况下的径向电磁力后,将使用数据采集器对直驱永磁牵引电机进行振动检测,并对检测结果进行分析,得到电机在不同速度下的振动速度和振动加速度。

2.1 振动检测

使用 SKF-AX 型数据采集器对 1 台新造的直驱永磁牵引电机进行振动检测,测量指标为振动速度  $v$  和振动加速度  $a$ 。

测量点位分别为:DE(传动)端水平、DE 端垂向、NDE 端水平以及 NDE(非传动)端垂向,转速分别为  $n = 90\text{ r/min}$ 、 $n = 95\text{ r/min}$ 、 $n = 100\text{ r/min}$  以及  $n = 105\text{ r/min}$ 。测量数据如表 1 所示,其中振动速度采样频率为 400 Hz,振动加速度采样频率为 8 kHz。

表 1 各转速测点振动速度与振动加速度

Tab.1 Vibration velocity and acceleration at each speed measurement point

$n/(r/min)$	测点	测量方向	$v/(mm/s)$	$a/(m/s^2)$
95	DE	X-水平	12.90	1.89
		Y-垂向	12.80	1.91
	NDE	X-水平	15.62	5.60
		Y-垂向	22.70	6.00
100	DE	X-水平	9.20	1.80
		Y-垂向	12.00	1.74
	NDE	X-水平	26.60	5.70
		Y-垂向	40.70	7.20

从测量结果来看,初步判定为电机在 90 ~ 105 r/min 转速范围内出现了共振现象。

2.2 频谱分析

对检测结果进行频谱分析,分离出振动加速度幅值及频率,具体如表 2 所示。

当  $n = 95\text{ r/min}$  时,可看出在 177 Hz 时,振动幅值最大,分别达到 1.00g ( $g$  为重力加速度)和 2.13g。

从表 2 频谱分析的结果中,可以得出如下结论:

- ① 电机转速在 95 r/min 和 100 r/min 时,振动速度及振动加速度最大;
- ② 从频谱上看,振动峰值只出现在 170 ~ 190 Hz 频段内,且随着转速的变化而变化。170 ~ 190 Hz 频段可能对应着某个零件的固有

表 2 各转速测点振动频率及加速度幅值  
Tab.2 Vibration frequency and acceleration amplitude at each speed measurement point

$n/(r/min)$	测点	测量方向	频率/Hz	$a/(m/s^2)$
95	DE	X-水平	177.5	0.373g
		Y-垂向	177.5	1.082g
	NDE	X-水平	177.5	1.020g
		Y-垂向	177.5	2.217g
100	DE	X-水平	187.5	0.861g
		Y-垂向	185.0	1.082g
	NDE	X-水平	185.0	2.483g
		Y-垂向	187.5	4.445g

频率,该频率被激起从而引发了共振。

本节对永磁直驱电机进行了振动检测试验并对试验结果进行了频谱分析,得到了永磁直驱电机在不同转速下的振动情况。

3 有限元仿真分析

上述通过解析法分析了直驱永磁电机的径向电磁力,并对电机进行了振动检测试验。在此基础上,通过有限元法对电机的径向力和模态进行分析,并与频谱分析结果进行对比。

3.1 径向力分析

应用 Maxwell 有限元分析软件进行分析,电机采用 114 槽 14 极的极槽配合;仿真在空载状态下,转速分别为 95 r/min 和 100 r/min 时,转子所受的径向力大小。当  $n = 95\text{ r/min}$  时,转子所受径向力如图 1 所示。将 Maxwell 软件所求的电磁力数据与 Ansys 软件谐响应分析模块相结合,对电机进行电磁振动计算。在  $n = 95\text{ r/min}$  转速工况下,电机最大振动频率为 183 Hz,振动速度为 8.6 mm/s;在  $n = 100\text{ r/min}$  转速工况下,电机最大振动频率为 190 Hz,振动速度为 14.6 mm/s,具体如表 3 所示。

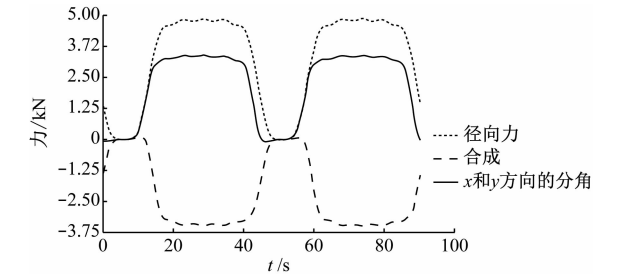


图 1  $n = 95\text{ r/min}$  下转子径向力截图  
Fig.1 Screenshot of radial force of lower rotor under force of 95 r/min

表 3 不同转速下电磁振动计算结果

Tab.3 Calculation results of electromagnetic vibration at different rotational speeds

转速/ (r/min)	电磁力幅值/ (kNm)	最大振动频率/ Hz	最大振动速度/ (mm/s)
95	4.855	183	8.6
100	4.830	190	14.6

3.2 模态分析

电机共振反映在整机定子部分产生剧烈共振,因此对电机进行模态分析,采用有限元分析计算定子的自振频率。定子各阶模态和振型如表 4 所示。

表 4 定子各阶模态及振型

Tab.4 Stator modal state of each order and vibration modes

阶数	频率/Hz	振型
一阶	190.24	椭圆振型沿 45° 方向
二阶	233.66	三瓣
三阶	278.99	径向四边形椭圆

通过上述分析,在 90 ~ 105 r/min 转速范围内径向电磁力波的频率为 180 ~ 190 Hz。这与定子固有频率相接近,且与解析法分析、试验检测频谱分析频率范围一致。由此可以得出:90 ~ 105 r/min 转速范围内径向电磁力波引起的共振是电机振动加剧的原因。

4 改进措施

在本节,将调整电机的极槽配合,并对其进行有限元仿真分析和振动检测试验。

4.1 有限元分析

将电机的极槽配合从 14 极 114 槽更改为 14 极 126 槽,分别分析  $n = 100$  r/min 和  $n = 115$  r/min 下的电磁振动。在  $n = 100$  r/min 转速工况下,电机最大振动频率  $f$  在 233.4 Hz,振动速度  $v$  为 0.683 96 mm/s,如图 2 所示;在  $n = 115$  r/min 转速工况下,电机最大振动频率在 281.82 Hz,振动速度为 0.099 7 mm/s。

4.2 振动检测试验

使用 SKF-AX 型数据采集器对 14 极 126 槽直驱永磁牵引电机样机进行振动检测,DE 端和 NDE 端振动速度值如表 5 所示。

通过有限元分析和振动检测试验可以看出,在 100 r/min 时,改进后电机的振动速度有显著的下降,有效解决了电机在 90 ~ 105 r/min 范围内的异音和振动问题。

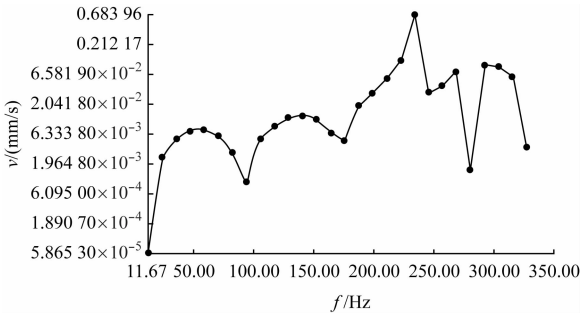


图 2  $n = 100$  r/min 下定子表面振动频谱曲线截图

Fig.2 Screenshot of the lower stator surface vibration spectrum curve at  $n = 100$  r/min

表 5 DE 端和 NDE 端振动值

Tab.5 Vibration value of the DE ends and the NDE ends

转速/ (r/min)	DE 端振动值/(mm/s)			NDE 端振动值/(mm/s)		
	水平	垂直	轴向	水平	垂直	轴向
100	0.25	0.20	0.15	0.20	0.10	0.10

5 结语

本研究针对大功率直驱永磁牵引电机在 90 ~ 105 r/min 转速范围内出现的振动加剧的问题,通过解析法、振动检测及有限元方法的手段找出了问题根源,并对电机进行了改进,解决了电机的振动问题,具体工作如下:

1) 通过解析法对电机在空载情况下的径向电磁力进行了分析,得出电机存在低阶径向电磁力波的极槽配合问题。

2) 使用 SKF-AX 型数据采集器对直驱永磁牵引电机进行了振动检测试验,并对检测结果进行了频谱分析,得出振动速度和振动加速度的变化规律。

3) 通过有限元仿真分析得出电机在 90 ~ 105 r/min 时径向力波的频率与电机定子结构的固有频率接近,并与试验检测数据对比,证明径向电磁力波引起的共振是电机振动加剧的根本原因。

4) 通过改进电机的极槽配合,电机的振动速度有了明显的降低,解决了电机在 90 ~ 105 r/min 范围内出现的共振问题。

文章结合理论分析、振动检测试验、有限元分析等 3 种分析方法,找到了电机在某频段振动噪声较大问题的根源,并提出了针对性的改进措施;找寻振动噪声的根源方法及针对振动噪声问题的改进方法可以为解决后续电机的振动噪声问题提供参考,具有重要的借鉴意义!

(下转第 154 页)

为最优,而疏散平台疏散方式相对传统的 A 车疏散而言可以提高紧急情况下隧道人员疏散的效率,更适合离车站距离近的隧道人员疏散。

## 参考文献

- [1] 钟茂华,刘畅,史聪灵. 地铁火灾全尺寸实验研究进展综述[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(10): 51.  
ZHONG Maohua, LIU Chang, SHI Congling. Progress of full-scale experimental study on metro fire[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 51.
- [2] 莫善军,李子荣,周南江,等. 基于 Phoenix 列车车厢火灾烟气数值模拟研究[J]. 铁路计算机应用, 2013, 22(7): 1.  
MO Shanjun, LI Zirong, ZHOU Nanjiang, et al. Research on numerical simulation of smoke movement in train compartment fire accidents based on phoenix[J]. Railway Computer Application, 2013, 22(7): 1.
- [3] 孙贵磊,王亚琪,赵欣圆,等. 基于 Pathfinder 的地铁乘客疏散风险量化与分级研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 176.  
SUN Guilei, WANG Yaqi, ZHAO Xinyuan, et al. Research on evacuation risk quantization and classification for subway passengers based on Pathfinder[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 176.

(上接第 146 页)

## 参考文献

- [1] 唐任远. 现代永磁电机:理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.  
TANG Renyuan. Modern permanent magnet machines[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [2] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.  
CHEN Shikun. Design of electrical motor[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [3] 许峻峰,李耘茏,许建平. 永磁同步电机作为机车牵引电机的应用现状及前景[J]. 铁道学报, 2005, 27(2): 130.  
XU Junfeng, LI Yunlong, XU Jianping. Present situation and perspective of applying permanent magnet synchronous motors to railway locomotives[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27

- [4] LI Y, WANG H, WANG C, et al. Personnel evacuation research of subway transfer station based on fire environment[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 431.
- [5] 易欣,范晶,马砺,等. 纵向通风对地铁区间隧道火灾温度特性影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 3163.  
YI Xin, FAN Jing, MA Li, et al. Effect of longitudinal ventilation on temperature characteristics in metro tunnel under fire[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(12): 3163.
- [6] 李真. 北京某地铁站的火灾和人员疏散模拟研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.  
LI Zhen. Study on fire and safety evacuation simulation of a Beijing subway station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [7] 李冬,苏燕辰,田鑫,等. B 型地铁列车火灾安全疏散性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1613.  
LI Dong, SU Yanchen, TIAN Xin, et al. Research on the evacuation performance of B-type subway train in the condition of fire disaster[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8): 1613.

(收稿日期:2021-05-19)

(2): 130.

- [4] 张欣,何家俊,吴超. 永磁同步电机电磁振动噪声抑制方法综述[J]. 微特电机, 2019, 47(7): 72.  
ZHANG Xin, HE Jiajun, WU Chao. A survey of electromagnetic vibration noise suppression methods for permanent magnet synchronous motors[J]. Small & Special Electrical Machines, 2019, 47(7): 72.
- [5] 韩雪岩,李生祥,米秀峰. 正弦波供电下永磁同步电动机径向电磁力波研究[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(4): 1.  
HAN Xueyan, LI Shengxiang, MI Xiufeng. Research on radial magnetic forces of permanent magnet synchronous motor supplied by sine wave[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(4): 1.

(收稿日期:2021-06-17)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com