

车用驱动电机电磁振动噪声源诊断技术

宋志环

(华域汽车电动系统有限公司, 上海 201323)

摘要: 由于车用驱动电机追求更宽的调速范围和更高的功率密度, 导致电机产生的振动噪声进一步增大。为此针对车用驱动电机电磁振动噪声产生的机理, 提出了适用于车用驱动电机不同电磁振动噪声源特征频率的识别方法。对电机定、转子磁场谐波进行分析, 得出了磁场频率的数学解析表达式。对电机电磁激振力的阶次和频率进行研究, 总结得出了不同电磁振动噪声源的特征频率。通过对电机电磁振动噪声测试数据进行诊断分析, 验证了所提诊断方法的准确性。

关键词: 永磁同步电动机; 特征频率; 电磁激振力; 振动模态

中图分类号: TM 306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)07-0097-05

Diagnostic Techniques for Electromagnetic Vibration and Noise of Traction Motor for Vehicle

SONG Zhihuan

(Huayu Automotive Electric Drive System Co., Ltd., Shanghai 201323, China)

Abstract: Since the broader the range of speed regulation and the higher the power density of traction motor was needed, the vibration noise was increased. Therefor aiming at the generation mechanism of electromagnetic vibration noise of traction motor, the identification method of characteristic frequency was proposed suitable for different electromagnetic vibration noise source. The magnetic field harmonic of motor stator and rotor was analyzed, thus the mathematical analytical expression on field frequency is elicited. Then the degree and frequency of electromagnetic excitation force was researched, thereby the characteristic frequency of different electromagnetic vibration noise source was summed up. Through the diagnostic analysis on the testing data of electromagnetic vibration noise, the accuracy of diagnostic method proposed was verified.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); characteristic frequency; normal electromagnetic force; mode of vibration

0 引言

由于生态环境的日益恶化, 人们对环境保护的关注程度越来越高。传统燃料汽车作为环境污染的主要因素之一, 正逐渐被新能源汽车所取代。世界各国政府都在大力支持新能源汽车的发展并推出相关鼓励和扶持政策^[1]。我国预计到 2020 年新能源汽车的总量将突破 500 万辆。车用驱动电机作为新能源汽车的核心部件, 直接影响到汽车的动力性能和舒适性。随着人们对汽车使用舒

适性要求的提高, 驱动电机的振动噪声受到了各方面的广泛关注。与传统电机相比, 车用驱动电机追求更高的功率密度和更宽的调速范围, 这直接导致电机的刚性更差, 电磁激振力的谐波成分更丰富, 因此更容易产生较大的振动和噪声。

近年来, 围绕电机振动噪声的研究一直是国内外学者关注的重点。在电机电磁激振力、结构模态和振动噪声原理方面都取得了诸多成果。文献[2]通过对永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)电磁力的研究, 归纳出

电机振动噪声与电磁力的解析关系,并通过分析得出当电机绕组相数增加时,可减少电机磁场谐波成分,进而减少电机电磁力。文献[3]对正弦波供电和变频器供电条件下,电机的振动噪声情况进行研究,分析了电流时间谐波对电机振动噪声的影响以及电流对称性与电机振动噪声的关系。美国学者 Guandong Jiao 等^[4]研究了永磁无刷直流电机定子电流与电磁力之间的关系,并推导出两者之间的解析表达式。同时分析了高速弱磁工况对永磁电机径向电磁力的影响。美国学者 Singli 等^[5]研究了变频器供电对电机振动噪声的影响,通过优化变频器产生的电流时间谐波,抑制与电机固有频率接近的电流谐波成分,使电机噪声降低了 8 dB。沈阳工业大学于慎波教授^[6]对 PMSM 的动偏心特性进行研究,通过分析电机在动偏心条件下的磁场分析,得出电机在动偏心时的径向电磁力,并研究了动偏心对电机转子临界转速以及振动噪声的影响规律。

以上为国内外学者对电机振动噪声方面的研究内容,但对车用驱动电机的电磁振动噪声特征频率和诊断技术的研究则未见公开发表的文献。本文在电机振动噪声现有研究成果的基础上,对车用驱动电机的磁场进行分析,得出了正弦波电流和时间谐波电流对电机磁场的影响规律,进而推导出正弦波供电和变频器供电条件下电机振动噪声源的特征频率,为电机电磁振动噪声源诊断技术提供了理论支持。

1 车用驱动电机振动噪声产生机理

按振动噪声产生的原因,车用驱动电机的振动噪声源可以分为机械振动噪声源、空气动力振动噪声源和电磁振动噪声源^[7]。车用驱动电机的机械振动噪声产生的原因包括轴承的磨损和转子不平衡等。一般来说,车用驱动电机的转速较高,最高转速可达 10 000~15 000 r/min。当存在转子加工或装配误差较大及轴承磨损严重时,将产生较大的机械振动噪声。空气动力振动噪声是由于气体的压力发生剧烈的变化或者与所流过通路的摩擦所引起的。由于车用驱动电机一般无风扇和通风沟,采用内置式转子结构即转子表面光滑,因此在一般情况下,空气动力噪声的影响较小。

电磁振动噪声由电机径向电磁力和切向电磁

力产生。径向电磁力由定子磁场谐波与转子磁场谐波相互作用形成,作用于定子齿表面的周期性力波。它使定子产生周期性振动,并通过空气向外辐射噪声,是电机产生电磁振动噪声的主要原因^[8]。由于车用 PMSM 存在齿槽转矩和转矩波动,也会使电机产生周期性的振动。当振动频率与电机的固有频率接近时,将引起电机产生较大的振动噪声。

车用驱动电机具有高功率密度和宽调速范围的特点^[9]。高功率密度意味着电机的刚性较差,宽调速范围意味着电机更容易产生共振,都对电机的振动噪声产生不利的影响。由于车用驱动电机采用变频器供电,其电流时间谐波将产生一系列定子磁场高次谐波。当高次谐波产生的径向电磁力与电机固有频率接近时将引起电机的高频振动噪声^[10]。由此可见,电磁振动噪声的抑制和诊断技术将是车用驱动电机设计的关键。

2 车用驱动电机磁场谐波分析

当车用驱动电机满足如下假设条件时:(1)不考虑铁心磁阻的影响;(2)不考虑铁心饱和的影响。那么电机磁场可表示为

$$b(\theta, t) = f(\theta, t) \lambda(\theta, t) \quad (1)$$

式中: $f(\theta, t)$ ——气隙磁动势表达式;

$\lambda(\theta, t)$ ——气隙磁导表达式。

由式(1)可知,气隙磁场可以表示为磁动势与磁导的乘积,即定子磁动势和转子磁动势与磁导相乘分别产生定子磁场和转子磁场。

2.1 定子谐波磁场分析

定子的谐波磁场可分为空间谐波磁场和时间谐波磁场 2 类:空间谐波磁场由定子绕组在空间上的分布作用产生;时间谐波磁场由绕组中的时间电流谐波产生。

首先分析定子空间谐波磁场,式(2)为电机的每极每相槽数,其中 Z_1 为定子槽数, m 为电机相数(车用驱动电机的相数一般为 3 相), p 为电机的极对数, c/d 为最简分数。

$$q = \frac{Z_1}{2mp} = b + \frac{c}{d} \quad (2)$$

当电机的每极每相槽数为整数时,车用驱动电机的定子谐波极对数可表示为

$$\nu = (6k + 1)p \quad (3)$$

其中: $k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 。

当电机的每极每相槽数为分数, 同时 d 为奇数时, 车用驱动电机的定子谐波极对数可表示为

$$\nu = (6k + 1)p/d \quad (4)$$

当电机的每极每相槽数为分数, 同时 d 为偶数时, 车用驱动电机的定子谐波极对数可表示为

$$\nu = 2(3k + 1)p/d \quad (5)$$

由于定子空间谐波磁场的旋转转速为 $n_0 p/\nu$, 所以空间谐波磁场的旋转频率为 f_0 , 即基波频率。

当电机采用变频器供电, 则电流时间谐波在定子磁场中将产生大量高频谐波成分, 尤其是在变频器的开关频率附近。这些高次谐波磁场以基波电流产生谐波磁场的 h 倍高速旋转, 其转速可以表示为 hn_0/ν , 旋转频率为 hf_0 。

PMSM 主要参数如表 1 所示。该电机定子为 24 槽, 转子为 22 极。

表 1 PMSM 主要参数

参数名称	参数值
定子槽数	24
极数	22
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	450
额定频率/Hz	82.5

电机采用变频器供电, 开关频率 f_T 为 1.5 kHz。由于定子电流注入了时间谐波成分, 导致电机的气隙磁密波形发生畸变, 如图 1 所示。对气隙磁密波形进行傅里叶分析, 可以得到气隙磁密频谱分析图, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 与正弦波供电相比, 气隙磁场在 1.5 kHz (即开关频率) 附近出现较多谐波分量, 谐波频率分别为 1 157、1 323、1 653、1 819 Hz, 此时电机的额定频率为 82.5 Hz。通过分析, 可以得出由于时间谐波的影响, 使电机在开关频率附近产生的谐波磁场频率满足表达式 $f_T - 4f_0$ 、 $f_T - 2f_0$ 、 $f_T + 2f_0$ 和 $f_T + 4f_0$ 。

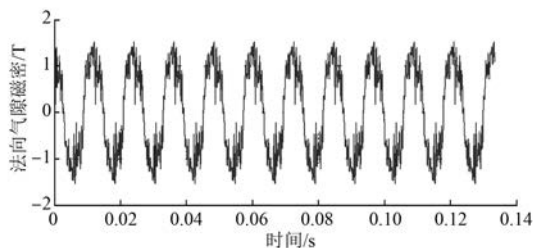


图 1 变频器供电时气隙磁场随时间变化的波形

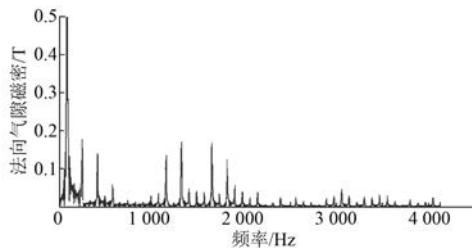


图 2 变频器供电时气隙磁场的频谱图

由以上分析可知, 电流时间谐波产生的定子谐波磁场的频率表达式如式(6)所示。其中, a 和 b 为奇偶性相反的正整数。

$$f_k = af_T \pm bf_0 \quad (6)$$

2.2 转子谐波磁场分析

对于车用驱动 PMSM, 其转子为永磁体励磁。当转子磁路完全对称时, 车用驱动电机的转子谐波极对数可表示为

$$\mu = (2k + 1)p \quad (7)$$

由于电机转子磁场的各次谐波分量均以同步转速旋转, 因此车用驱动电机的转子谐波磁场频率可表示为

$$f_\mu = \mu f_0/p \quad (8)$$

3 电磁振动噪声特征频率分析

根据麦克斯韦定律能够推导出径向电磁力的表达式:

$$P_n(\theta, t) = \frac{b^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (9)$$

式中: μ_0 ——真空磁导率。

将定、转子基波磁场和谐波磁场代入式(9)可以得到电机磁场谐波产生的径向电磁力表达式为

$$P_n(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} \{A + B + C + D + E\}^2 \quad (10)$$

其中: $A = B_0 \cos(p\theta - \omega_0 t - \varphi_0)$

$$B = \sum_{\nu} B_{\nu} \cos(\nu\theta - \omega_0 t - \varphi_1)$$

$$C = \sum_{\mu} B_{\mu} \cos(\mu\theta - \mu\omega_0 t/p - \varphi_2)$$

$$D = \sum_{l_1} B_{0\lambda_1} \cos[(\pm l_1 Z_1 + p)\theta - \omega_0 t - \varphi_3]$$

$$E = \sum_{\mu} \sum_{l_1} B_{\mu\lambda_1} \cos[(\pm l_1 Z_1 + \mu)\theta - \mu\omega_0 t/p - \varphi_4]$$

将式(10)展开, 即可得到正弦波供电时电机

振动噪声源的特征频率,如表 2 所示。

表 2 正弦波供电时振动噪声源特征频率

磁场作用形式	特征频率表达式
基波气隙磁场	$f=2f_0$
定子 ν 次谐波磁场	$f=2f_0$
转子 μ 次谐波磁场	$f=2\mu f_0/p$
基波磁场与定子 ν 次谐波磁场	$f=2f_0$
定子基波磁场与转子谐波磁场	$f=(\mu/p\pm 1)f_0$
定子 ν 次谐波与转子谐波磁场	$f=(\mu/p\pm 1)f_0$

同理,将定子电流时间谐波产生的磁场代入式(10),即可得到变频器供电时电机振动噪声源的特征频率,如表 3 所示。

表 3 变频器供电时电机振动噪声源特征频率

磁场作用形式	特征频率表达式
B_{hp} 与 B_p 作用	$f=cf_T\pm df_0$
$B_h\nu$ 于 B_p 作用	$f=cf_T\pm df_0$
B_{hp} 于 B_μ 作用	$f=af_T\pm bf_0\pm(2k+1)f_0$
$B_h\nu$ 于 B_μ 作用	$f=af_T\pm bf_0\pm(2k+1)f_0$

表 3 中, B_{hp} 为定子时间谐波电流产生的基波磁场, $B_h\nu$ 为定子时间谐波电流产生的谐波磁场, B_p 为转子基波磁场, B_μ 为转子谐波磁场。其中 a 和 b 为奇偶性相反的正整数, c 和 d 为奇偶性相同的正整数。

4 电磁振动噪声源诊断技术

本文对 1 台车用驱动 PMSM 在运行过程中出现较大振动噪声的问题进行诊断和分析,并针对噪声诊断结果对电机的电磁方案进行优化设计。车用驱动电机的主要参数如表 4 所示。

表 4 车用驱动电机主要参数

参数名称	参数值
电机型式	PMSM
峰值功率/kW	150
最高转速/($r\cdot min^{-1}$)	6 000
定子铁心外径/mm	290
定子槽数	54
极对数	6

车用驱动电机的模型如图 3 所示。该电机采

用内置式转子结构,磁钢为“U+V”形排布。

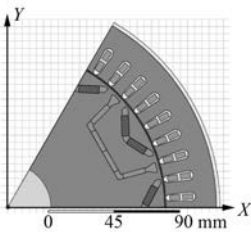


图 3 车用驱动电机模型

新能源汽车在 WOT 工况运行时出现刺耳的噪声,初步判断为电机振动噪声引起。驱动电机布置在整车中的位置如图 4 所示。



图 4 电机在整车中的布置位置

通过车上布置的噪声传感器,测得新能源汽车在运行过程中的噪声频率图如图 5 所示。电机的运行转速为 1 000~3 600 r/min。

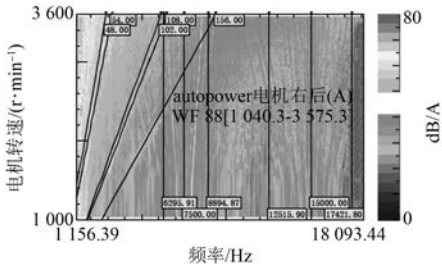


图 5 噪声测试彩图

从噪声测试结果中可以看出该新能源汽车运行中的主要噪声频谱分布情况。驱动电机变频器的开关频率为 7 500 Hz,在 7 500 Hz 和 15 000 Hz 附近出现烟花状的噪声带,其噪声频率与表 3 列出的变频器供电振动噪声源特征频率一致。由此可见,这 2 处噪声是电流时间谐波产生的。

由表 2 中的正弦波供电时电机振动噪声源特征频率可知,图 5 中的 48、108、156 阶(以上阶次对应机械转速阶次)噪声是由径向电磁力产生的,其中 108 阶(对应电磁振动噪声 18 阶)的噪声最大。表 5 所示为产生 18 阶电磁振动噪声的定、

转子谐波磁场。由表 5 可知,18 阶电磁振动噪声是由转子 102 次谐波极对数和定子-102 次谐波极对数,以及转子 114 次谐波极对数和定子 114 次谐波极对数相互作用产生,其中定子-102 次和 114 次谐波极对数对应于定子二阶齿谐波。

表 5 电磁振动噪声频率		
转子谐波极对数	定子谐波极对数	
	-102	114
102	18 阶噪声	
114		18 阶噪声

为抑制电机的电磁噪声,对电机的原电磁方案进行优化,在满足技术要求的前提下,通过采用优化转子斜极角度和磁钢布置位置等措施,降低 18 次径向电磁力的幅值,以达到降低电机噪声的目的,并根据新的电磁方案重新制造样机进行噪声测试。

本文对电磁方案优化前后的样机进行噪声对比测试,测试结果如图 6 所示。优化后 108 阶次噪声比优化前降低 5 dB(A),降低了整车的噪声水平,达到了抑制电磁振动噪声的目的。

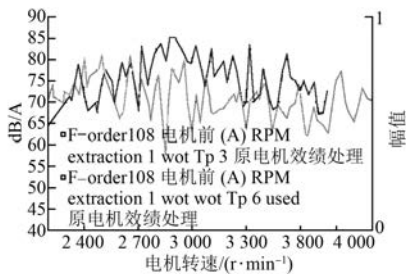


图 6 优化前后电机噪声测试对比

5 结 语

针对新能源汽车驱动电机电磁振动噪声产生的机理,对定、转子谐波磁场的谐波极对数和频率进行分析,在此基础上推导出正弦波供电和变频器供电条件下车用驱动电机电磁振动噪声源的特征频率表达式,为后续电机电磁振动噪声源诊断技术提供理论依据。最后,本文对 1 台新能源汽车驱动电机的电磁振动噪声源进行诊断,通过诊断分析得出 18 阶电磁力是引起整车振动噪声的主要因素。该阶电磁力是由转子谐波磁场与定子

二阶齿谐波相互作用产生的。根据该诊断结果采取抑制噪声的措施,使电机噪声降低了 5 dB(A),从而验证了本文提出的电磁振动噪声源诊断方法的准确性。

【参 考 文 献】

[1] 唐葆君,刘江鹏.中国新能源汽车产业发展展望[J].北京理工大学学报,2015,17(2): 1-6.

[2] TAEGEN F, KOLBE J, VERMA S P. Vibrations and noise produced by special purpose permanent-magnet synchronous motors in variable frequency operation [C] // Proceedings of The Fourth IEEE International Conference on Power Electronics AND drive Systems, 2001: 583-588.

[3] CHENET S, JAVADI H, LEFEVRE Y, et al. Theoretical and experimental studies of the effects of the feeding currents on the vibrations of magnetic origin of permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(3): 1837-1842.

[4] JIAO G D, RAHN C D. Field weakening for radial force reduction in brushless permanent magnet DC motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(5): 3286-3292.

[5] OTERO S G, DEVANEY M. Minimization of acoustic noise in variable speed induction motors using a modified PWM drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(3): 111-115.

[6] 于慎波.永磁同步电动机振动与噪声特性研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2005.

[7] 程福秀,林金铭.现代电机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

[8] AYDIN M. Axial flux surface mounted permanent magnet disc motors for smooth torque tranction drive applications [D]. Madison: University of Wisconsin, 2004.

[9] EHSANI M, GAO Y, EMADI A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles—fundamentals, theory, and design [M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.

[10] GIERAS J F, WANG C, LAI J C. Noise of polyphase electric motors [M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.

收稿日期: 2018 -01 -03