

基于电机本体的新能源客车电磁噪声分析

赵吉星, 周立新, 刘伟, 李文军

(卧龙电气驱动集团股份有限公司 浙江省重点企业研究院汽车电机研发中心, 浙江 绍兴 312300)

摘要: 为了研究新能源整车在行驶过程中的高频电磁噪声, 采用试验与仿真相结合的方法, 对某款新能源客车进行噪声、振动与声振粗糙度(NVH)测试, 对新能源客车电机进行电磁仿真分析。对求解的电磁力密度进行时空的二维傅里叶变换, 结合试验数据确定了电磁噪声主要来自于0阶72倍频; 从电机本体出发, 以电机转子的磁钢夹角、磁钢长宽等结构参数为设计变量, 优化电机电磁力密度与转矩脉动; 同时对优化后的模型利用有限元方法进行电磁、结构与声学等多物理场联合仿真, 进一步求解电机的电磁噪声, 并进行整车的NVH试验验证。试验结果表明: 优化后的整车总体噪声减小了8.53 dB(A), 电机72倍频噪声最大值减小了18.59 dB(A), 减速机7阶噪声最大值减小了5.02 dB(A), 仿真结果与试验测试结果吻合。

关键词: 新能源客车电机; 电磁噪声; 转矩脉动; 多物理场; NVH

中图分类号: TM 301.4⁺3 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0064-06

doi: 10.12177/emca.2020.046

Analysis of Electromagnetic Noise of New Energy Bus for the Motor Structure Optimization

ZHAO Jixing, ZHOU Lixin, LIU Wei, LI Wenjun

(EV Motor Research Center, Key Enterprises Institute of Zhejiang Province, Wolong Electric Drive Group Co., Ltd., Shaoxing 312300, China)

Abstract: To study the high frequency electromagnetic noise of the new energy electric vehicle during running, the noise, vibration and harshness (NVH) test and electromagnetic simulation analysis of some kind of new energy bus are carried out. Two-dimensional Fourier transform is made in the time domain and space domain on the solved electromagnetic force density, and it is determined that the electromagnetic noise is mainly caused by the 0 order 72nd harmonics according to the experimental data. The motor structural parameters of the motor rotor such as the angle between the magnetic steels, the length and width of the magnetic steel and so on, are taken as design variables to optimize the electromagnetic force density and torque ripple of the motor. Meanwhile, the multi-physics fields simulation of the electromagnetic field, structure and acoustics is made to solve the electromagnetic noise with the finite element method based on the optimized model, and the NVH tests of the vehicle are carried out to validate the simulation results. Test results show that the overall noise of the vehicle is reduced by 8.53 dB(A), the maximum noise of the 72nd harmonics of the motor is reduced by 18.59 dB(A), and the maximum 7th order noise of the gearbox is reduced by 5.02 dB(A). Simulation results are consistent with experimental test results.

Key words: new energy bus motor; electromagnetic noise; torque ripple; multi-physics fields; noise, vibration and harshness (NVH)

收稿日期: 2020-03-20; 收到修改稿日期: 2020-04-28

作者简介: 赵吉星(1982—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为新能源汽车电机、动力总成及整车的NVH。

周立新(1970—), 男, 工程师, 研究方向为新能源汽车电机总体技术把关。

刘伟(1981—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源汽车电机电磁方案设计及整机的技术把关。

0 引言

纯电动新能源汽车与传统燃油车相比,用电机取代了发动机,以蓄电池作为储能动力源驱动电机运转从而推动汽车行驶。因此,纯电动新能源汽车具有振动噪声小、节能、清洁环保等优点。目前纯电动新能源汽车中的小型乘用车、城市公交、城市大巴等已经开始推广应用。国家也出台了相关的扶持政策,推动新能源汽车的发展,同时对新能源汽车进行补贴,鼓励科研院所与相关企业对新能源汽车的关键技术比如燃料电池的寿命、续航里程、新材料开发、电机电控的电磁性能、温升等难点做进一步技术与攻关^[1]。目前新能源汽车用户反馈比较多的一个问题就是噪声、振动与声振粗糙度(NVH)问题,即新能源汽车比传统燃油车噪声小但是高频噪声突出,高频噪声处于人耳敏感的范围之内,会影响乘客乘坐体验。因此,研究新能源汽车的高频噪声对提高新能源汽车乘坐的舒适性以及对新能源汽车的推广具有重要的意义。

纯电动新能源汽车的高频噪声主要包含电机的高频电磁噪声与减速机的高频啸叫。其中,减速机的高频啸叫除了受减速机齿轮本身的设计参数与加工制造等因素影响外,还与电机的转速转矩波动等相关。国内外学者对新能源汽车电机的NVH做了相关的研究,主要集中在电机电磁力的理论分析以及电机本体结构模态优化分析等方面。王东刚等^[2-4]从电机电磁力的理论分析出发推导电磁力主要的振动阶次与频率,建立三维整机模型进行模态分析与优化,同时利用瞬态动力学分析电机的振动特性,并与理论分析进行比对验证。杨浩东等^[5-7]利用谐波注入方法分析控制器电流对电机电磁噪声的影响,同时分析电机定转子的相关设计参数,对电机转矩波动以及径向电磁力的影响。李晓华等^[8]根据电机电磁力的理论进行推导分析,并用试验验证0阶电磁力波是电机振动产生电磁噪声的主要力波源。Islam等^[9-12]对电机的极槽配合以及电机模态分析,研究了不同极槽配合对电机转矩脉动、振动噪声的影响。黄厚佳等^[13-16]利用不同的计算方法采用斜槽、不同的定子长宽比、槽口尺寸以及不同的转子开孔方案优化电磁力等对电机减振降噪。以上

的研究成果均是围绕电机电磁力的机理研究以及电机电磁振动分析,对模型做了很多的简化假设,对于电磁噪声声学分析与试验测试分析以及新能源整车的电磁噪声分析还需进一步的研究。

本文基于电机本体,以某台新能源客车用永磁同步电机(PMSM)为研究对象,试验测试分析电机的振动噪声阶次成分,利用有限元方法求解电机电磁力密度各个阶次的分布规律,改变电机本体定转子结构参数,优化求解电机电磁力与转矩脉动;建立电机的电磁、结构与声学的联合仿真,求解电机的电磁噪声,并进行整车的试验验证。整个的分析方法流程对于新能源整车的高频电磁噪声优化具有重要的参考意义。

1 电机电磁力分析

利用麦克斯韦应力原理可求得电机定子铁心内表面上单位面积的径向电磁力^[2]:

$$p_r(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} [b_r^2(\theta, t) - b_t^2(\theta, t)] \approx \frac{b_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

切向电磁力为

$$p_t(\theta, t) = \frac{1}{\mu_0} [b_r(\theta, t) \cdot b_t(\theta, t)] \quad (2)$$

式中: θ 为转子的位置角度; $b_r(\theta, t)$ 为径向气隙磁密; $b_t(\theta, t)$ 为切向气隙磁密; μ_0 为空气磁导率。

根据电机理论计算, $b_r(\theta, t) \gg b_t(\theta, t)$, $p_r(\theta, t) \gg p_t(\theta, t)$,引起电机振动产生电磁噪声主要是径向电磁力^[4]。气隙磁密 $b_r(\theta, t)$ 是时间与空间的函数, θ 是电机转子在某一特定位置时定子内表面的气隙磁密随着圆周位置角度 $0^\circ \sim 360^\circ$ 而变化,同时气隙中的磁密也随着时间 t 而变化。因此,径向电磁力密度 $p_r(\theta, t)$ 也是时间与空间的函数,利用二维傅里叶分解可求得电磁力密度在空间与时间上的分布^[12]:

$$F(\theta, t) = F_0 + \sum \sum F_{uv} \cos(up\omega_r t + vp\theta + \theta_0) \quad (3)$$

式中: F_0 为电磁力密度直流分量; F_{uv} 为电磁力密度各次谐波幅值; u 为时间谐波阶数; p 为电机极对数; ω_r 为基频; v 为空间谐波阶数; θ_0 为转子的初始相位。

电机电磁力密度时间与空间阶数非常丰富,

根据文献[8],可知空间 0 阶电磁力密度对电磁噪声贡献最大。本文以 12 极 72 槽峰值扭矩 2 800 N·m 的某新能源客车电机为研究对象,分析其电磁噪声。该新能源客车电机在整车加速过程中高频噪声非常尖锐刺耳,而且声音大。为此,对整车进行 NVH 测试,采用西门子 LMS Test.Lab 测试系统,在电机、车架与车内地板各贴 1 个三向振动传感器,在车内座椅附近贴 1 个噪声传感器。整车 NVH 测试传感器布置如图 1 所示。

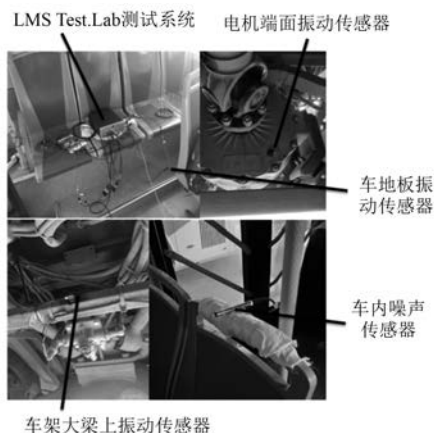


图 1 整车 NVH 测试传感器布置

测试工况为整车从零加速至最高车速(约 70 km/h),测试数据分析如图 2~图 5 所示。

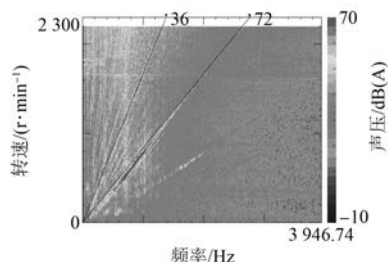


图 2 车内噪声阶次分布

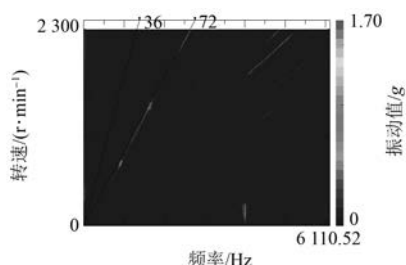


图 3 电机径向振动阶次分布

从图 2 可知,72 倍频噪声贡献最大,36 倍频次之。从图 3~图 5 可知,72 倍频的振动阶次最

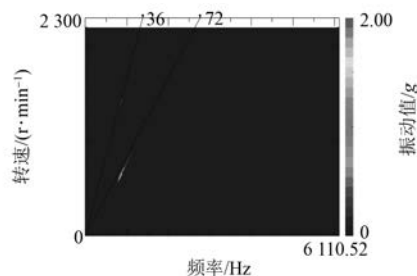


图 4 车架垂向振动阶次分布

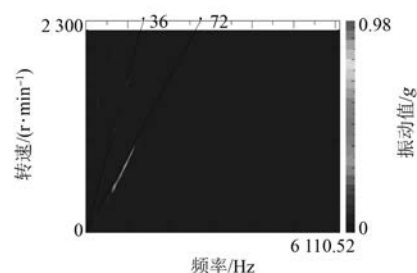


图 5 车地板垂向振动阶次分布

大,36 倍频振动阶次次之。根据前面的电磁力密度的理论分析,振动力波源来自于 0 阶 36 倍频与 0 阶 72 倍频的电磁力。对样机进行电磁仿真计算,求解电磁力,进一步分析电磁力密度的时间与空间阶次。

根据 NVH 测试分析结果,电机转速在约 700 r/min 时整车振动噪声最大,因此建立整机电磁仿真模型,利用相关的电磁仿真软件求解整机模型在电机转速 700 r/min 条件下电机定子铁心表面的电磁力密度。取定子内表面圆周为空间距离,以一个电频率周期为时间,利用二维傅里叶变换对电磁力密度进行时间与空间分解,电磁仿真模型以及电磁力密度的时空分布及二维傅里叶分解如图 6~图 8 所示。

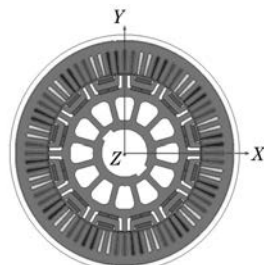


图 6 整机电磁仿真模型

从图 8 可知,0 阶 0 倍频以及 72 阶 0 倍频是电磁力密度的直流分量,不会引起电机定子振动,

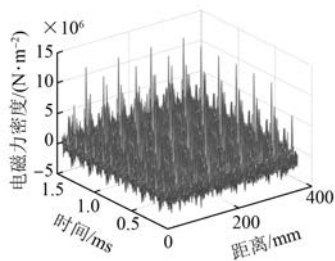


图7 电磁力密度的时空分布

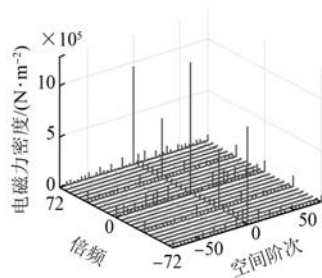


图8 电磁力密度的二维傅里叶变换

除了直流分量之外 0 阶 72 倍频在电磁力密度分解中最大,引起较大的电磁噪声,与前文理论分析一致。为此,需要对电机模型进行优化,以减小电磁力密度。

2 电磁噪声优化

关于减小电磁噪声主要有以下 2 个方面考虑:(1) 从控制器出发,优化控制器的开关频率与谐波电流,或者利用谐波注入技术削弱特定的谐波阶次;(2) 从电机本体出发,优化电机定转子相关结构参数,优化电机气隙磁密,从而减小电机电磁力密度,减小电机电磁力密度以减小电磁振动从而减小电磁噪声。本文从电机本体出发,优化电机转子的结构参数,以减小电机电磁力密度。

该新能源客车以电机与减速机组成动力总成,因此电机的转矩脉动对减速机齿轮啮合的传递误差产生影响,从而导致减速机齿轮的高频啸叫与敲击声。因此,在优化电机电磁噪声的过程中,以电机转矩脉动与径向电磁力密度为目标函数,以电机的平均转矩 $\geq 2\,800\text{ N}\cdot\text{m}$,铁耗最小等其他电磁性能参数为约束条件,以电机转子的磁钢夹角、磁钢长宽、磁桥厚度等参数为设计变量,对电磁仿真模型优化计算。优化前后数据对比如表 1、表 2 所示。

表 1 优化前后设计变量变化

设计变量	范围	优化前	优化后
磁钢夹角/(°)	122~180	180.0	149.6
隔磁桥宽度/mm	1~3	1.8	2.4
磁钢长度/mm	15~20	17.3	18.7
磁钢宽度/mm	3~7	6.5	5.9

表 2 优化前后电磁力密度时空阶次与转矩脉动

优化目标	优化前	优化后
0 阶 36 倍频电磁力密度/($\times 10^5\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$)	4.868	3.25
0 阶 72 倍频电磁力密度/($\times 10^5\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$)	5.106	2.2
转矩脉动/%	31	5.9

根据表 1 与表 2 的结果,优化后电机的 0 阶 72 倍频明显降低,0 阶 36 倍频也有所减小,电机的转矩脉动减小幅度大。为此,对电机整机模型进行电磁、结构振动与声学的多物理场联合仿真进一步求解电机的电磁噪声。

3 电机多物理场振动噪声仿真

电机振动噪声的有限元仿真涉及电磁、结构与声学等多物理场,需要进行联合仿真。求解思路是先进行电机电磁场的仿真,求解电机定子齿部的电磁力密度,然后把电磁力密度作为输入激励,对电机整机模型进行谐响应的结构振动计算,最后把求得的振动位移、速度或者加速度作为声学激励,利用声学有限元或者声学边界元法求解场点声压。整个仿真过程中需要注意有限元仿真模型的一致性,同时需要保证数据传输过程中单位的一致性。本文采用声学边界元法对整机模型进行多物理场联合仿真,求得声学结果如图 9~图 12 所示。



图9 优化前 72 倍频电磁噪声

在整个多物理场联合仿真中,由于对仿真模型做了许多假设与简化,以及电机定转子材料参数为各向异性,难以确定具体数值,仿真中采用的

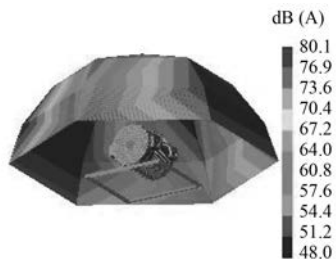


图 10 优化后 72 倍频电磁噪声



图 11 优化前 36 倍频电磁噪声

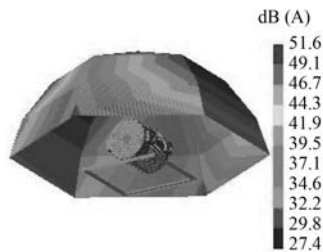


图 12 优化后 36 倍频电磁噪声

是试验测试的试验值,因此仿真的声学结果与实际测试噪声值有差别。但是,优化前后仿真的差值可以相互抵消简化假设带来的误差,因此重点关注优化前后噪声的差值,优化后 72 倍频噪声最大值减小了 10.6 dB(A),36 倍频噪声最大值减小了 10.3 dB(A)。

4 试验结果验证

根据仿真优化结果,电机的 72 倍频噪声与 36 倍频噪声已经明显减小,电机的整体噪声减小。因此,根据优化的电磁方案重新制作样机进行整车 NVH 测试,测试工况与优化前测试工况一样。测试结果表明,整车的总噪声值减小,整车的高频噪声明显减小,其中高频电磁噪声没有优化前尖锐刺耳,主观感觉达到用户的接受程度,具体的测试数据分析如图 13~图 18 所示。

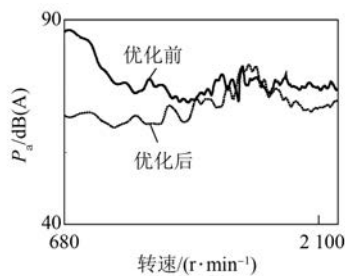


图 13 优化前后车内总噪声

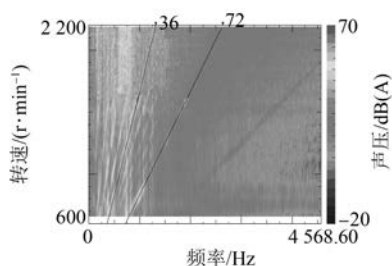


图 14 优化后车内噪声阶次分布

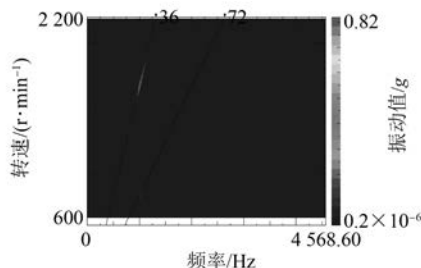


图 15 优化后车地板垂向振动阶次分布

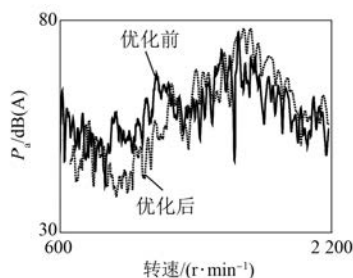


图 16 优化前后车内 36 阶噪声

从图 13~图 15 可知,整车的噪声最大值减小了 8.53 dB(A),噪声最大值在 36 倍频、72 倍频已经明显减小,车辆地板振动最大值在 36 倍频、72 倍频也明显减小。电机的 72 倍频振动也明显减小,车架振动、车辆地板的振动也有所减小,由于篇幅所限,没有全部列出。根据振动噪声测试

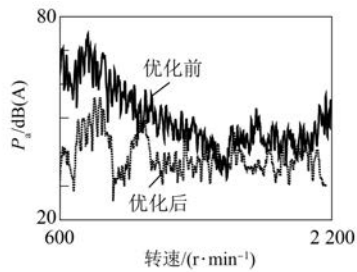


图 17 优化前后车内 72 阶噪声

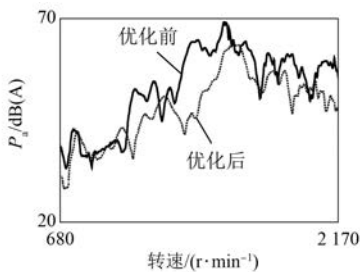


图 18 优化前后减速机 7 阶噪声

结果,电机的 36 倍频对整车振动噪声贡献最大。从图 16~图 18 可知,优化前后电机的 36 倍频噪声最大值差别较小,但在低速段约 700 ~ 1 200 r/min 优化后明显减小,电机的 72 倍频噪声最大值减小了 18.59 dB(A),整个转速范围内都减小了;由于转矩脉动的降低,减速机的 7 倍频噪声优化后最大值减小了 5.02 dB(A),在中高转速约 1 000 r/min 以上时,减速机 7 阶噪声优化后也明显减小;整车的噪声已经明显减小,经过用户的验证,噪声结果达到用户要求的标准。

根据测试分析结果结合前面多物理场联合声学仿真结果,电机在 700 r/min 下仿真与测试结果以及减速机与整车噪声数据如表 3 所示。

表 3 优化前后仿真与测试结果		dB(A)	
优化前后的差值	仿真差值	实测差值	
电机 36 倍频噪声最大值	↓ 10.3	↓ 11.2	
电机 72 倍频噪声最大值	↓ 10.6	↓ 13.08	
减速机 7 倍频噪声最大值	—	↓ 5.02	
整车总噪声最大值	—	↓ 8.53	

根据表 3 的对比结果分析可知,优化前后电机的 36 倍频噪声与 72 倍频噪声最大值差值仿真结果与实测结果非常吻合,证明了优化方法的正确性,多物理场的电磁、结构与声学联合仿

真的结果与试验测试结果的在趋势上是一致的,结果可信。同时,为进一步开展减速机与电机组成的动力总成多物理场 NVH 联合仿真奠定了基础。

5 结 语

本文基于电机本体对某新能源客车电磁噪声仿真与试验分析,得出如下结论:

(1) 对电机仿真模型求解电磁力密度,利用二维傅里叶变换分析电磁力密度的空间与时间阶次,结合 NVH 试验测试数据,确定了电磁噪声贡献最明显的时空阶次为 0 阶 72 倍频;

(2) 从电机本体出发,对转子结构优化,优化结果减小了电磁力密度与转矩脉动,经过试验验证,优化结果是正确可信的;

(3) 建立了电磁、结构与声学的多物理场联合仿真模型求解电磁噪声,仿真结果与试验结果吻合,整车总噪声与减速机的阶次噪声明显降低,达到用户要求,证明多物理场的联合仿真是可行的。同时,该分析方法也为新能源汽车电磁噪声的研究与降噪提供了一种思路。

【参考文献】

[1] 国务院.国务院关于印发节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020 年)的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/govweb/gongbao/content/2012/content_2182749.htm

[2] 王东刚.永磁同步电机高频振动与噪声研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

[3] 于慎波.永磁同步电动机电磁振动与噪声特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2006.

[4] 左言言.永磁同步电机电磁振动与噪声分析[D].镇江:江苏大学,2015.

[5] 杨浩东.永磁同步电机电磁振动分析[D].杭州:浙江大学,2011.

[6] 宋志环.永磁同步电动机电磁振动噪声源识别技术的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2010.

[7] 廖勇,甄帅,刘刃,等.用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J].中国电机工程学报,2011,31(21): 119.

[8] 李晓华,刘成健,梅柏杉,等.电动汽车 IPMSM 宽范围调速振动噪声源分析[J].中国电机工程学报,2018,38(17): 5219.

(下转第 92 页)