

# 车用永磁同步电机径向力波灵敏度分析和优化<sup>\*</sup>

左曙光, 马琮淦, 何融, 孙庆, 孟姝

(同济大学新能源汽车工程中心 上海, 201804)

**摘要** 为了降低电动车电磁噪声,以电动车用永磁同步电机为研究对象,建立了有限元参数化模型,计算径向力波。通过解析法和试验,验证了有限元参数化模型的正确性。应用该模型,以永磁体厚度、气隙长度、定子槽中心宽度、定子槽开口宽度 4 种结构因素为设计变量,以 1 阶、2 阶、3 阶径向力波能量和径向力波均值最小为目标函数,进行了影响径向力波的结构因素灵敏度分析。结合电机设计要求,提出了改变气隙长度和定子槽中心宽度的参数优化方案,有限元计算结果显示优化方案改善了径向力波。

**关键词** 电动车; 永磁同步电机; 径向力波; 灵敏度分析; 优化

**中图分类号** U461.4; TB533

## 引言

电动车有别于传统内燃机汽车,其使用电机作为驱动部件。由于频繁的起动、加速、匀速、制动,电动车用电机的使用工况远比其他工业驱动用电机的使用工况复杂。因此,工作环境特殊性使电动车用电机的电磁噪声问题比较突出<sup>[1-5]</sup>。

电机的主要噪声源为径向力波,其作用于定子,使定子振动而辐射噪声<sup>[6]</sup>。因此改善径向力波成为降低电机噪声的重要举措。研究径向力波的方法主要有解析法和数值法。由于现有解析法未考虑槽型变化、磁路饱和等因素,不能精确计算;而计算机技术快速发展,数值法尤其是有限元法,越来越多地应用于径向力波分析。文献[7]应用电磁场有限元法和麦克斯韦张量法计算了径向力波,研究了极槽配合对永磁同步电机振动和噪声的影响。文献[8]提出了基于二维有限元法计算定子齿上的径向力波的步骤,比较了 4 种不同拓扑结构的永磁同步电机噪声和振动性能。文献[9]描述了一种精确预测永磁同步电机电磁噪声的数值模型,建模过程中采用三维有限元法精确计算了径向力波。文献[6-10]采用的有限元法能准确分析永磁同步电机径向力波,但很难解决电动车用永磁同步电机径向力波多工况、多变量的复杂优化问题。

笔者运用时步有限元方法,实现了有限元软件的二次编程开发,设计了多个结构变量,建立了电动车用永磁同步电机的有限元参数化模型<sup>[11-12]</sup>,可方便实现多工况、多变量的灵敏度分析。通过该模型与解析法、试验对比,验证了模型的正确性。在此基础上,进行径向力波优化,为分析复杂工况运行的电动车用永磁同步电机提供了一种新方法。

## 1 电机有限元参数化模型的建立及验证

### 1.1 径向力波解析模型

由 Maxwell 定律,电磁径向力波由电机气隙磁场产生,并作用于定子铁心内表面单位面积上,正比于磁通密度的平方

$$p_n(\theta, t) = \frac{b^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

其中: $p_n(\theta, t)$ 为径向力波; $\mu_0$ 为空气磁导率; $b(\theta, t)$ 为气隙磁密, $\theta$ 为空间角度, $t$ 为时间。

当忽略铁心中的磁位差时,气隙磁密为

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

其中: $\lambda(\theta, t)$ 为气隙磁导; $f(\theta, t)$ 为气隙磁势。

气隙磁导直接引起径向电磁力波的变化,气隙磁导由 4 部分组成

$$\lambda(\theta, t) = \Lambda_0 + \sum_{k_1} \lambda_{k_1} + \sum_{k_2} \lambda_{k_2} + \sum_{k_1} \sum_{k_2} \lambda_{k_1 k_2} \quad (3)$$

<sup>\*</sup> 国家基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2011CB711201);国家自然科学基金资助项目(51075302)  
收稿日期:2012-03-08;修改稿收到日期:2012-05-30

其中: $\Delta_0$ 为磁导的恒定分量; $\lambda_{k_1}$ 为转子光滑、定子开槽时的谐波磁导, $k_1$ 为转子光滑、定子开槽时定子谐波磁导次数; $\lambda_{k_2}$ 为定子光滑、转子开槽时的谐波磁导, $k_2$ 为定子光滑、转子开槽时转子谐波磁导次数; $\lambda_{k_1 k_2}$ 为定、转子均开槽时相互作用的谐波磁导。

定、转子气隙磁势也是影响径向力波的主要因素。在永磁同步电机中,气隙磁势主要由定子励磁电流和转子永磁体产生

$$f_c = \frac{N_c I_c}{2} \quad (4)$$

$$f_m(\theta, t) = f_0(\theta, t) + \sum_v f_v(\theta, t) + \sum_\mu f_\mu(\theta, t) \quad (5)$$

$$f(\theta, t) = f_c + f_m(\theta, t) \quad (6)$$

其中: $f_c$ 为定子励磁电流产生的气隙磁势; $N_c$ 为定子一个槽内线圈匝数; $I_c$ 为一匝线圈电流大小; $f_m(\theta, t)$ 为转子永磁体产生的气隙磁势; $f_0(\theta, t)$ 为基波合成磁势; $f_v(\theta, t)$ 为定子绕组 $v$ 次谐波磁势; $f_\mu(\theta, t)$ 为转子 $\mu$ 次谐波磁势。

结合实际电机模型(转子表面光滑,无气隙磁导),略去振动阶数高、振幅小的力波分量,得到径向力波的计算式

$$p_n(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} \left\{ \frac{B_1^2}{2} \cos(2p\theta - 2\omega_r t - 2\varphi_{0r}) + \sum_v \sum_\mu B_v B_\mu \cos[(\mu \pm v)\theta - (\omega_\mu \pm \omega_r)t - (\varphi_\mu r \pm \varphi_{0r})] \right\} \quad (7)$$

其中: $B_1, B_v, B_\mu$ 分别为定子基波磁密幅值、定子 $v$ 次磁密幅值、转子 $\mu$ 次磁密幅值; $p$ 为极对数; $\omega_r$ 为同步

电角速度; $\varphi_{0r}$ 为定子基波磁势与磁导恒定分量的相角; $\varphi_{\mu r}$ 为转子 $\mu$ 次谐波磁势与磁导恒定分量的相角; $\varphi_{0v r}$ 为定子 $v$ 次谐波磁势与磁导恒定分量的相角。

## 1.2 电机有限元参数化模型的建立与径向力波的计算

利用有限元分析软件 ANSYS 的 APDL 语言进行二次开发,建立了电动车用永磁同步电机有限元参数化模型<sup>[11-12]</sup>,并通过适当加密网格,很好地考虑了转子多工况运动、电机开槽、饱和的影响。电机有限元参数化模型如图 1 所示。

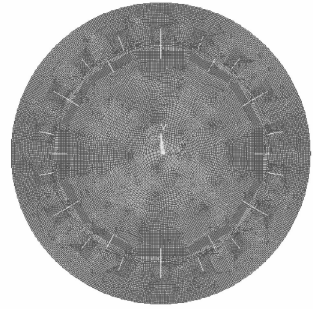


图 1 电机有限元参数化模型

采用时步有限元法<sup>[12]</sup>,将连续时间离散成等间时刻,计算各个时刻由定子和转子分别产生的气隙磁密空间分布;将有限元计算数据导入 MATLAB,应用麦克斯韦应力方程,编程计算得到径向力波频率、阶数和各阶幅值。时步有限元法计算径向力波流程如图 2 所示。

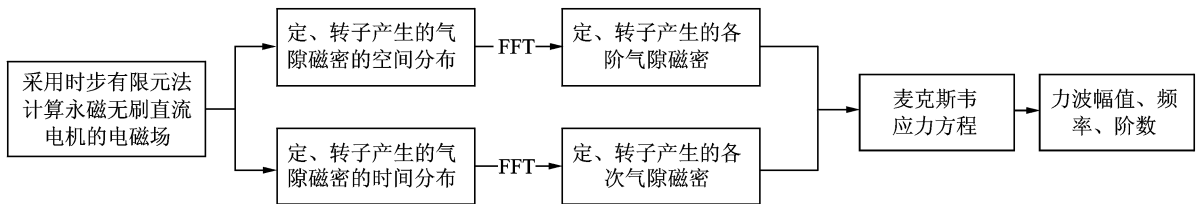


图 2 时步有限元法计算径向力波流程图

流程图中,经推导,计算作用于定子内表面的各次电磁力波面密度的麦克斯韦应力方程为

$$p_r(x, t) = p_r \cos(rx - \omega_r t - \theta_r) = \frac{B_{\mu i} B_{\lambda j}}{2\mu_0} \cos(rx - \omega_r t - \theta_r) \quad (8)$$

其中: $B_{\mu i}$ 为定子产生的气隙磁密谐波幅值; $B_{\lambda j}$ 为转子产生的气隙磁密谐波幅值; $r$ 为力波次数, $r = \mu_i + \lambda_j$ ; $\mu_i$ 为定子产生的力波次数; $\lambda_j$ 为转子产生的力波次数; $\theta_r$ 为力波初相角。

因此,只要计算出定、转子产生的各次气隙磁密

谐波的幅值、次数和频率即可求出作用于定子内表面的各次径向电磁力波。图 3 是额定工况下的径向力波时域图和频域图,图中显示,径向力波的能量主要集中在 1, 2, 3 阶。

## 1.3 电机噪声测试试验

永磁同步电机的径向振动和电磁噪声主要由径向力波作用于定子结构而产生。由于径向力波不易直接测量,笔者根据电机定子表面径向振动信号和

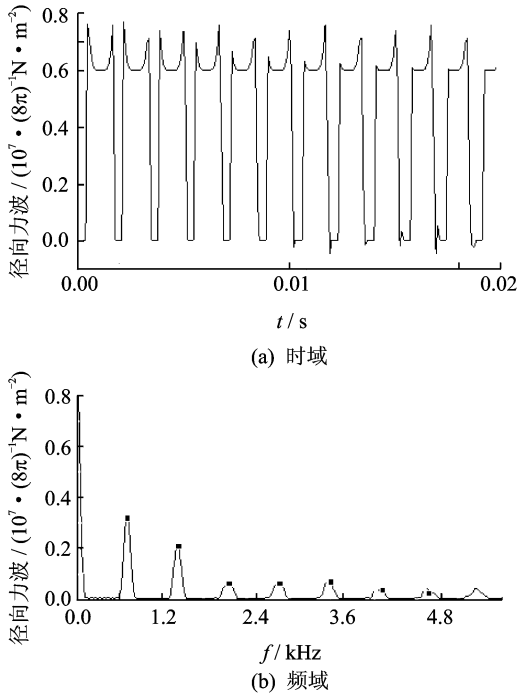


图 3 径向力波时域和频域分析(3.1 kr/min)

电机电磁噪声信号的频谱特性反推径向力波的频率特性。为测量电动车用永磁同步电机径向振动信号和电磁噪声信号,本试验根据国家标准《GB T10069. 1-2006 旋转电机噪声测定方法及限值》,采用了平行六面体测试面布置了麦克风,并在电机定子表面布置了径向加速度传感器,如图 4 所示。测试工况为本电机的额定工况(3.1 kr/min)。3.1 kr/min 时,电机旋转频率为  $3\ 100/60=51.6$  Hz,由图 5 可知,电机定子表面径向振动的主要峰值频率是电机转频的倍频,在 3 721.1 和 4 375.56 Hz 时峰值较大。仔细观察表 1 发现,从第 3 个峰值频率开始,每个倍频数都是 6 的倍数,这正好等于永磁体极对数。



图 4 电机噪声试验

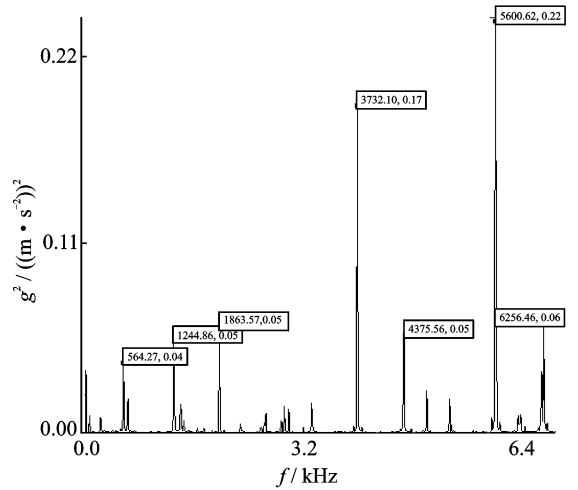


图 5 电机径向振动加速度功率谱(3.1 kr/min)

### 1.4 有限元模型的验证

将通过试验值、解析理论值、有限元计算值进行两方面对比,验证有限元模型。

#### 1.4.1 电磁径向力波频率

由表 2 可得,理论计算误差和有限元计算误差都控制在试验值 1% 以内,可以认为理论模型已经较好地解释了试验力波的几个频率峰值。但相比较

表 1 主要峰值频率与电机转频倍数

主要振动峰值频率/Hz	51.6	564.27	1 244.86	1 863.57	3 732.10	4 375.56	5 600.62	6 256
转频倍数	1	11	24	36	72	84	108	120

表 2 径向力波(试验值、解析计算理论值、有限元计算值)主要频率对比( $n=3.1$  kr/min)

参数	径向力波频率/Hz							
试验值	626.1	1 244.86	1 863.57	3 732.1	4 375.56	5 600.62	6 256	
理论计算值	626	1 240	1 878	3 756	4 382	5 634	6 260	
有限元计算值	626	1 240.9	1 869.9	3 737.8	4 378.8	5 616.6	6 254.1	
理论计算误差/%	-0.016 0	-0.390 4	0.774 3	0.640 4	0.147 2	0.596 0	0.063 9	
有限元计算误差/%	-0.016 0	-0.318 1	0.339 7	0.152 7	0.074 0	0.285 3	-0.030 4	

而言,有限元计算误差比理论计算误差要小得多,特别是高频段比较明显,这说明了有限元模型比理论模型更接近于真实物理模型。

#### 1.4.2 径向力波各阶次能量分布

为了更好地验证有限元模型,本节将理论计算得到的各阶径向力波通过定子总成传递函数反应到电机机壳上,将有限元计算得到的径向力波时域信号通过定子总成的谐响应分析转化到电机机壳的径向振动,并进行对比(图6)。

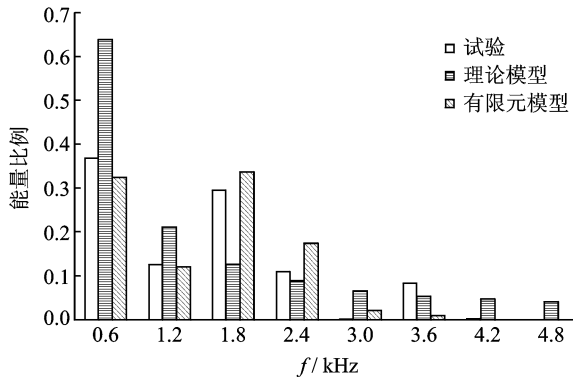


图6 噪声试验、解析计算及有限元计算主要频率处径向力波频谱图

由图6幅值上观察,有限元模型计算得到的力波频谱更接近实际噪声频谱。由此表明有限元模型的正确性和优越性,同时为后面的分析提供了保障。

## 2 基于有限元参数化模型的径向力波灵敏度分析

### 2.1 设计变量

影响电磁径向力波的因素包括电磁参数和结构参数,但无论是哪种参数都是通过改变气隙磁场从而影响径向力波的。不管是结构参数还是电磁参数,最终都归结到电机结构参数。电机中影响气隙磁场波形的主要结构因素有永磁体厚度、气隙长度、定子齿中心槽宽度及定子开口槽宽度等结构参数。

本研究选取永磁体厚度、气隙长度、定子槽中心宽度及定子槽开口宽度4种结构因素为设计变量,进行灵敏度分析(表3)。

表3 设计变量及数值 mm

设计变量	数值				
永磁体厚度	3.5	4	4.5	5	5.5
气隙长度	0.49	0.69	0.89	1.09	1.29
定子槽中心宽度	8.65	10.65	12.65	14.65	16.65
定子槽开口宽度	1.5	2	2.5	3	3.5

### 2.2 仿真结果

基于有限元参数化模型,进行仿真计算,结果如图7~10所示。

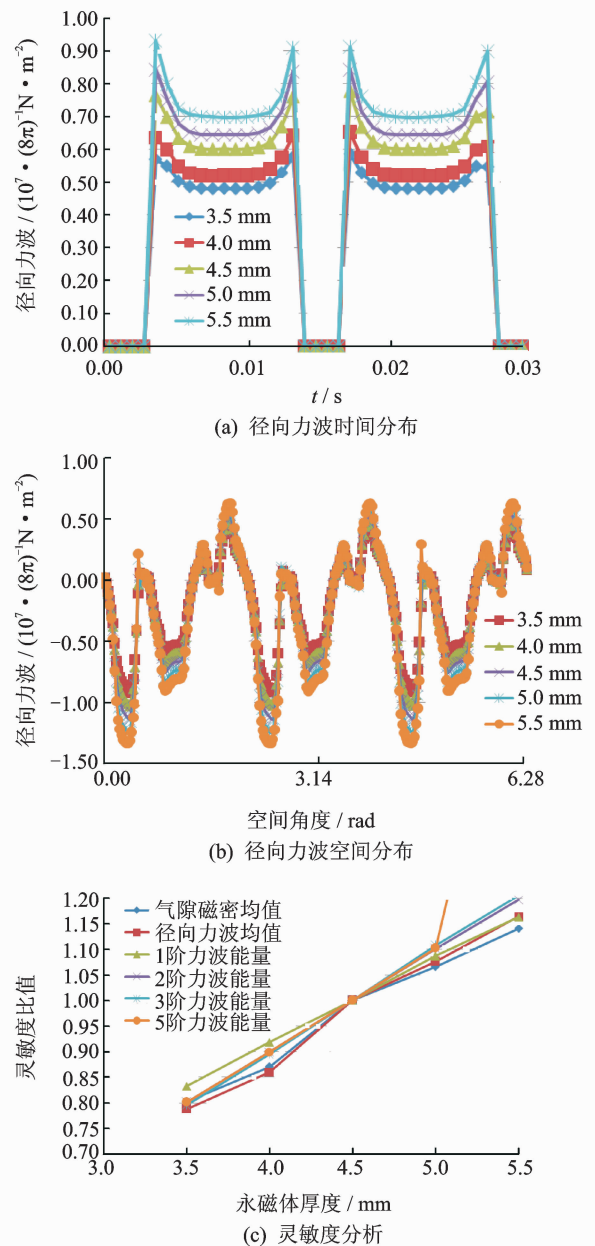


图7 基于永磁体厚度的径向力波分析

由于4个参数的原始大小各异,差别很大,选取统一量纲的对比显得不科学,本文采用如下的处理方式评价各个参数对电磁力波的灵敏度。以永磁体为例:永磁体厚度的原始值为 $h_0$ ,此时的气隙磁密的均值为 $b_0$ 。此结构参数的变化范围为 $h_1 \sim h_2$ ;在 $h_1$ 时,气隙磁密相对于原始的气隙磁密为 $b_1$ ,在 $h_2$ 时气隙磁密相对于原始气隙磁密为 $b_2$ 。考虑到绝大部分力波特性的值呈单调变化,因此定义平均变化率 $k_b$ 。

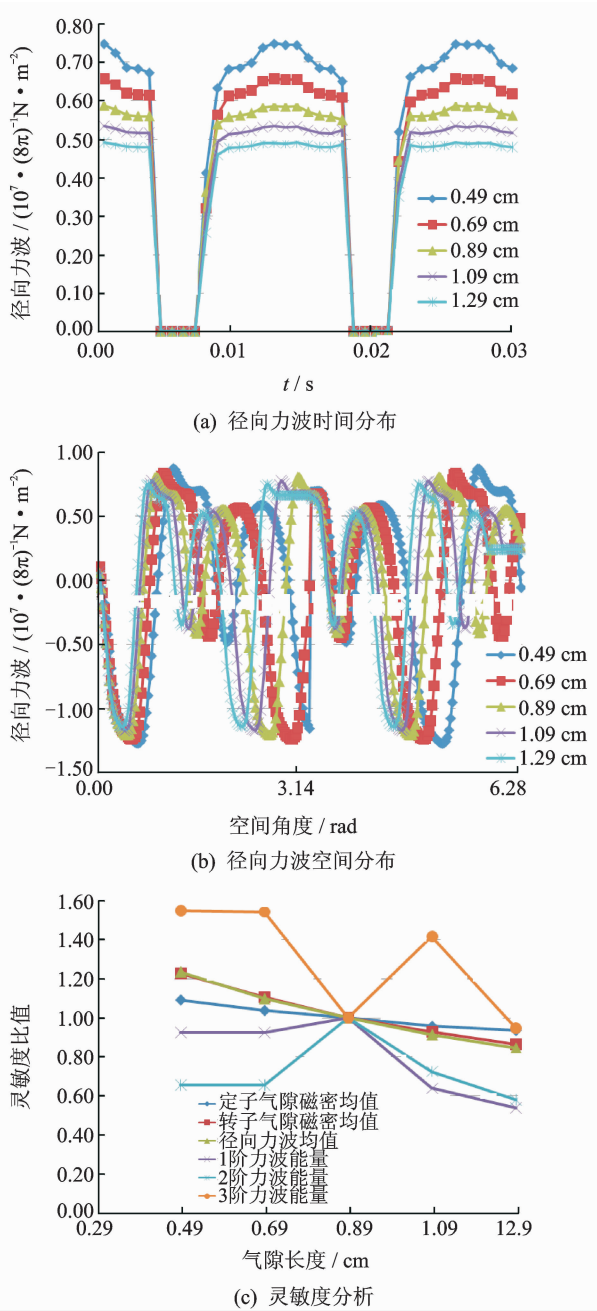


图8 基于气隙长度的径向力波分析

$$k_b = \frac{(b_2 - b_1)/b_0}{(h_2 - h_1)/h_0} \quad (9)$$

将原始结构参数(电机原始结构参数为永磁体厚度 4.5 mm、气隙长度 0.89 mm、定子槽中心宽度 12.65 mm、定子槽开口宽度 2.5 mm)和原始结构对应的径向力波作为标准,分析电磁力波参数的变化率/结构参数变化率,经过归一化处理,得到各个结构参数变化对径向力波灵敏度比较。由图 11 可知,永磁体厚度和定子槽中心宽度对径向力波敏感,随着尺寸增加,径向力波各阶能量均增加;气隙长度对径向力波较敏感,随着尺寸增加,径向力波各阶能量均减小;定子开口槽宽度对径向力波不敏感。

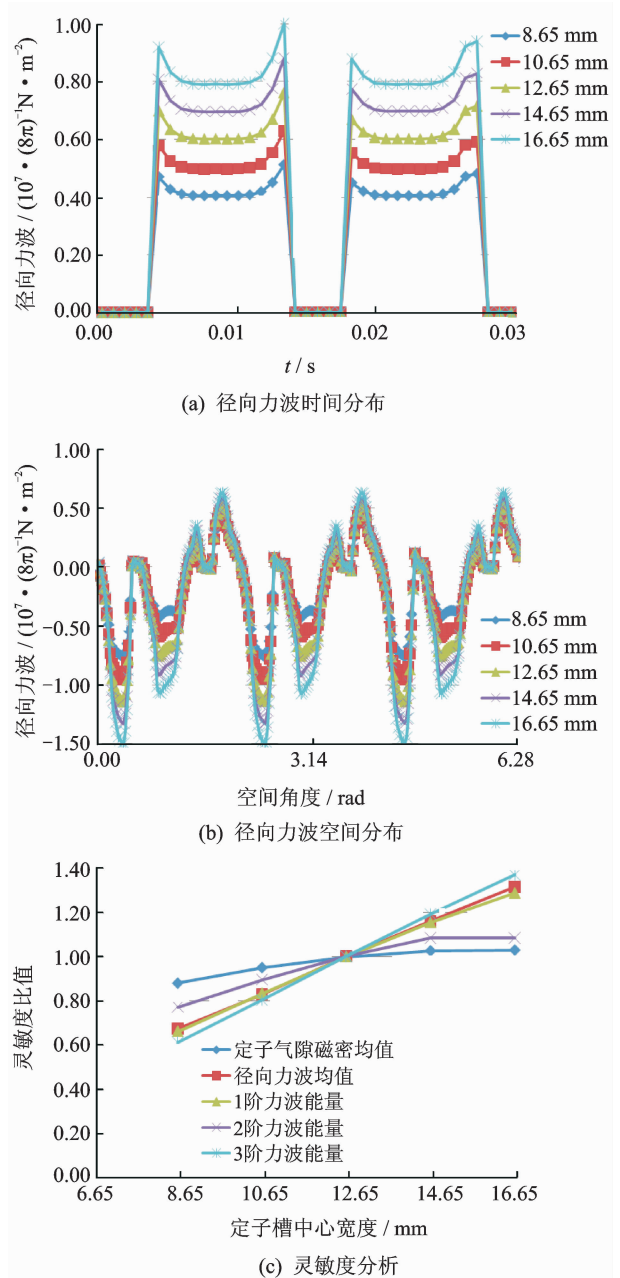


图9 基于定子槽中心宽度的径向力波分析

### 3 基于改善电磁径向力波的电机结构参数优化

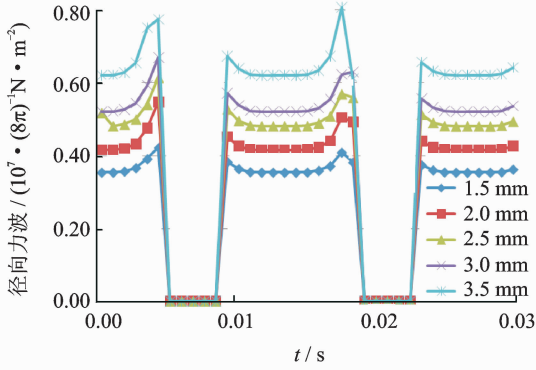
#### 3.1 电机结构参数优化方案的确定

在不改变电机主要尺寸(定子铁芯长度和直径)和齿槽配的前提下,进行优化方案确定。

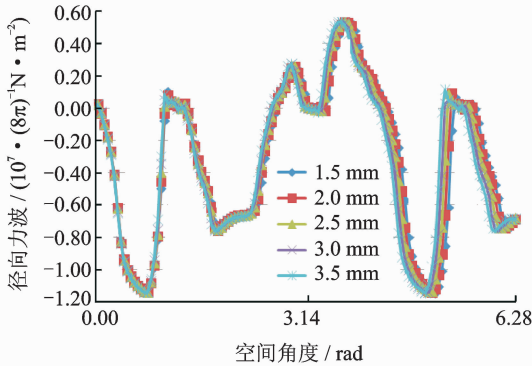
##### 1) 主要减噪阶数的确定

由有限元计算和试验可知:626, 1 244.8, 1 863.57 Hz这3个峰值能量很大,也就是说主要能量集中在1,2,3阶的径向力波中,所以这3阶径向力波成为主要的减噪目标。

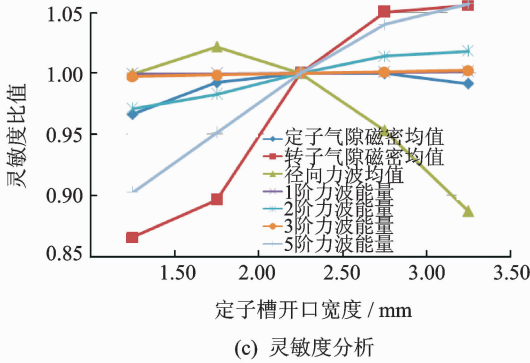
##### 2) 需修改的结构参数的确定



(a) 径向力波时间分布



(b) 径向力波空间分布



(c) 灵敏度分析

图10 基于定子槽开口宽度的径向力波分析

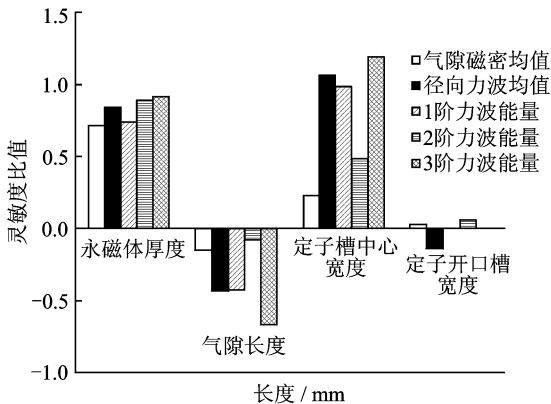


图11 基于原始结构尺寸的径向力波特性和参数灵敏度比较直方图

由图12可知:永磁体厚度和定子槽中心宽度对1阶、2阶、3阶力波能量都比较敏感,所以要降低这三阶能量最直接有效的就是减小永磁体厚度、减小定子槽中心宽度,但是永磁体结构参数同样对气隙磁密很敏感,过多的减小这个尺寸,直接会影响电机的运动性能;气隙长度的增大会减小力波能量,且对气隙磁密的降低相对较小;定子开口槽宽度对力波能量改变不大。故将定子槽中心宽度和气隙长度确定为最后的结构修改参数。

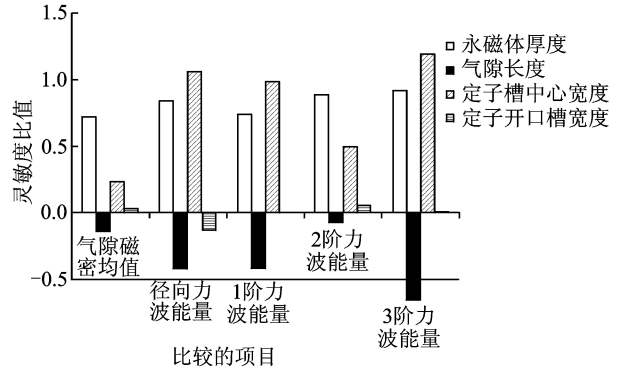


图12 结构参数对径向力波的影响

### 3) 改善尺寸的确定

根据电机现有的设计尺寸,绕组的槽满率为62%,所以过度地减小定子槽中心宽度会导致线圈放置空间不够,经过计算,最后确定极限值为中心宽度减小1.8 mm,所以将最后的齿槽中心宽度定为 $12.65 - 1.8 = 10.85$  (mm);气隙长度更不能无限制增大,参考电机设计,对于小型无刷直流电机而言,气隙长度的范围一般是0.5~2.5 mm,所以取上限值为2.5 mm。

### 4) 改善前后对比

将修改后的几何模型图与原始几何模型图作对比,如图13所示。

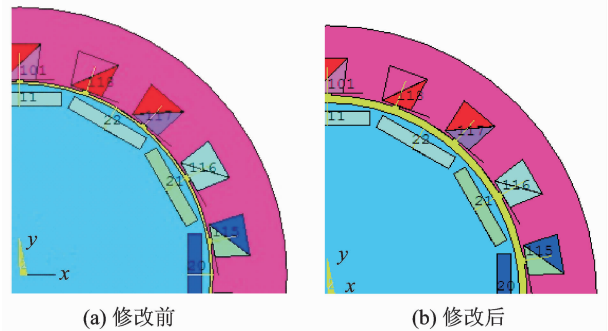


图13 参数修改前、后的电机结构

## 3.2 优化方案的有限元仿真结果

由图14可知:气隙磁密和径向力波均值均下降

不多,意味着电机性能基本不变;1阶、2阶径向力波能量减少约50%,3阶径向力波能量下降约20%。因此,改善后的模型可行性较高,且对于径向力波谐波成分有很好的抑制,可以推想,改善结构后的电机电磁噪声会有很大的抑制。

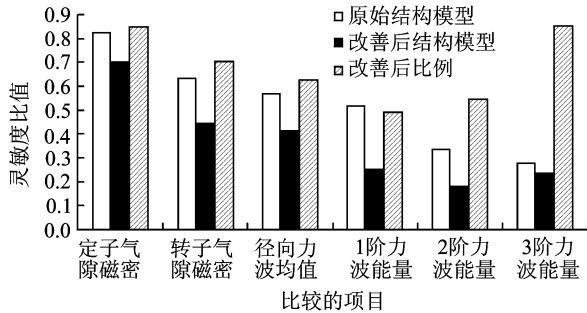


图14 结构改善前、后径向力波特性对比图

## 4 结论

1) 建立了电动车用永磁同步电机有限元参数化模型,分析了电机结构参数对径向力波的灵敏度。研究表明:永磁体厚度、定子槽中心宽度对径向力波幅值有正的影响,气隙长度对径向力波幅值有负的影响,定子槽开口宽度对径向力波幅值影响不大。

2) 在保证电机性能的前提下,可以通过适当增加气隙长度、减小定子槽中心宽度降低1阶、2阶、3阶径向力波。

## 参 考 文 献

- [1] 曹秉刚,张传伟,白志峰. 电动车技术进展和发展趋势[J]. 西安交通大学学报,2004,38(1):1-5.  
Cao Binggang, Zhang Chuanwei, Bai Zhifeng. Technology progress and trends of electric vehicles[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004,38(1):1-5. (in Chinese)
- [2] Hong-Seok Ko, Kwang-Joon Kim. Characterization of noise and vibration sources in interior permanent-magnet brushless DC motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004,40(6):3482-3489.
- [3] 蔡建江,左曙光,刘学明,等. 燃料电池轿车驱动电机悬挂的优化设计[J]. 振动、测试与诊断,2008,28(1):5-9.  
Cai Jianjiang, Zuo Shuguang, Liu Xueming, et al. Optimization design of fuel cell car's driving motor mount[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008,28(1):5-9. (in Chinese)
- [4] 何吕昌,左曙光,申秀敏,等. 基于空调压缩机支架改进的燃料电池轿车降噪[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(3):339-343.  
He Lvchang, Zuo Shuguang, Shen Xiumin, et al.

Noise reduction based on the frame improvement of air-condition of fuel cell vehicle[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(3): 339-343. (in Chinese)

- [5] 马琮淦,左曙光,何吕昌,等. 电动车用永磁同步电机电磁转矩的解析计算[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(5):756-761.  
Ma Conggan, Zuo Shuguang, He Lvchang, et al. Analytical calculation of electromagnetic torque in permanent magnet synchronous motor for electric vehicles[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2012,32(5):756-761. (in Chinese)
- [6] Sakamoto S, Hirata T, Kobayashi T, et al. A vibration analysis considering higher harmonics of electromagnetic forces for rotating electric machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999,35(3):1662-1665.
- [7] Sun Tao, Kim J M, Lee G H, et al. Effect of pole and slot combination on noise and vibration in permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011,47(5):1038-1041.
- [8] Islam R, Husain I. Analytical model for predicting noise and vibration in permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010,46(6):2346-2354.
- [9] Torregrossa D, Peyraut F, Fahimi B, et al. Multiphysics finite-element modeling for vibration and acoustic analysis of permanent magnet synchronous machine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011,26(2):490-500.
- [10] 龚宇,崔巍,施进浩. 永磁电机有限元时步法的研究与应用[J]. 微特电机,2005(10):5-8.  
Gong Yu, Cui Wei, Shi Jinhao. Research and application on permanent-magnetic motor using finite element time-stepping method[J]. Small and Special Electrical Machines, 2005(10):5-8. (in Chinese)
- [11] Ma Conggan, Zuo Shuguang, He Rong, et al. Application of ANSYS secondary development in magnetic density analysis of permanent magnet synchronous motor[J]. Advanced Materials Research, 2011, 199-200: 1140-1144.
- [12] Ma Conggan, Zuo Shuguang, He Rong, et al. Radial electromagnetic force wave analysis of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle[J]. Advanced Materials Research, 2011, 211-212: 948-952.



**第一作者简介:**左曙光,男,1968年6月生,教授、博士生导师。主要研究方向为汽车系统动力学、机械结构振动与噪声控制。曾发表《基于声辐射控制的半结构优化设计》《同济大学学报:自然科学版》2012年第40卷第1期)等论文。

E-mail:sgzuo@tongji.edu.cn

