

分析与探讨

轮毂电机电磁噪声测试方法及特性分析

**An electromagnetic noise test method for in-wheelmotor
and the analysis of the noise characteristics**

左曙光，王青松，吴旭东，孙 庆，谭钦文

ZUO Shu-guang, WANG Qing-song, WU Xu-dong, SUN Qing, TAN Qin-wen

(同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

摘要：设计了一种轮毂电机在负载扭矩作用下的电磁噪声测试方法，对不同转速和负载扭矩下的轮毂电机电磁噪声进行了测试，试验结果表明转速对电磁噪声影响较大，而负载扭矩对其影响不明显。基于Ansoft建立气隙磁场有限元模型，求解径向力波，并以此为激励力求解电机外转子的受迫振动响应，利用LMS.VIRTUAL.Lab建立轮毂电机电磁噪声边界元模型，基于正交试验原理对轮毂电机电磁噪声进行仿真计算，分析了产生该试验现象的原因：由于轮毂电机外转子模态频率较高，转速提高导致径向力波频率增大，进而容易引起轮毂电机结构共振，产生较大噪声辐射；而负载扭矩的增加不会影响径向力波的频率，只是使得径向力波的幅值略有增加，因此负载扭矩的增加对轮毂电机的振动状态影响不大，对噪声的影响也不明显。

关键词：轮毂电机；分布式驱动；噪声试验；电磁噪声；正交原理

中图分类号：TM341; TM351 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-0134(2014)09(上)-0077-05

Doi: 10.3969/j.issn.1009-0134.2014.09(上).20

0 引言

分布式驱动电动车采用轮毂电机作为驱动元件，具有传动链短、传递高效等特点，是电动汽车发展的重要方向^[1,2]。由于轮毂电机直接安装在轮辋内，导致电动车的非簧载质量增大，电机的振动直接传递到车内，使得轮毂电机成为了电动车的主要振动源之一。同时，气隙磁场中产生的径向电磁力波作用于定、转子表面产生电磁振动，向外辐射形成电磁噪声^[3]，对电动车的乘坐舒适性有重要影响。

为有效降低电机的电磁噪声，国内外学者对电机电磁噪声展开了广泛而深入的研究。文献[4]测定了电动车用无刷直流电机噪声特性，并通过改善定子结构参数，使该电机电磁噪声降低了5dB。文献[5]通过声强测试原理，在测试平台上测试了电动车用直流电机的声功率和声强特性，论证了声强测试的可行性，并确定了电机各频段噪

声的源头。文献[6]对800kW感应电机的振动噪声进行了试验分析，测定了该电机在近声场的噪声特性，并进行了相干分析，研究了声源的振动特性。比利时学者在研究感应电动机电磁噪声时，指出当电磁力的频率接近定子的固有频率时，可产生较大的噪声^[7]。文献[8]测出了车用电机噪声频谱随转速的变化规律，提出了一些降低车用电机噪声的建议。

目前对于传统内转子电机振动噪声的理论与试验研究已较为完善^[9~11]，对传统内转子电机进行噪声测试时，一般通过测功机对电机转子施加负载，用联轴器连接被测电机与测功机^[12]。由于轮毂电机采用外转子驱动，连接测功机存在一定的困难，且联轴器刚度不足会产生额外的振动噪声，导致轮毂电机在负载扭矩作用下的噪声测试试验实现起来存在一定的难度。

针对轮毂电机外转子驱动以及低速大扭矩的

收稿日期：2014-03-04

基金项目：国家自然科学基金项目：分布式驱动电动汽车电动轮-悬架系统高频振动特性研究（51375343）；重大科研仪器设备专项：燃料电池汽车动力系统动态性能综合测试仪器开发及应用(2012YQ150256)；国家重点基础研究

发展计划973项目：高性能分布式驱动电动汽车关键基础问题研究（2011CB711201）

作者简介：左曙光（1968-），男，教授，博士，研究方向为汽车系统动力学。

制造业自动化

特点，设计了一种新的轮毂电机电磁噪声测试方案，该测试方法可以方便地对不同负载扭矩下的外转子电机进行噪声测试。结合仿真计算探讨了转速和负载两个因素对轮毂电机电磁噪声的影响规律。

1 轮毂电机噪声试验

1.1 测试方案

为准确测定轮毂电机在负载扭矩作用下的电磁噪声，本节提出了一种简单有效的轮毂电机噪声测试方案，并进行了噪声测试试验。

试验装置及测点布置如图1所示。两台型号相同的电机用螺栓固定在一起，一台为驱动电机，另一台为负载电机，螺栓固连起联轴器的作用，这样既能实现负载扭矩的添加，同时保证了对中性，不会因为轴的刚度不足造成额外的振动噪声，并且节省了成本。在距径向和端盖0.3m处的三个场点布置麦克风，获取电磁噪声的总声压级信号。由于两台电机结构完全相同，所以固有特性也完全一致。在稳定运行时转速、输出扭矩以及控制电流均相同，所以产生的电磁激励力也完全一致。因此，两台电机运行时产生的电磁噪声理论上是完全一致的，所以可以将两台电机视为一个整体来测试其噪声。

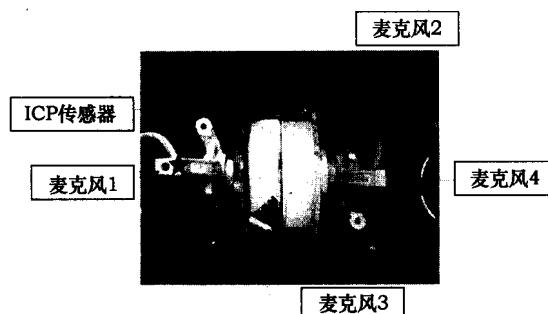


图1 试验测点布置图

试验电机为某微型电动车用轮毂电机，选取电机转速分别为100rpm、200rpm、300rpm、400rpm和500rpm，负载扭矩分别为10Nm、20Nm、30Nm、40Nm。采用变频器供电，进行轮毂电机噪声试验。

1.2 试验结果分析

通过轮毂电机电磁噪声试验，可以测得各稳态工况下的电机声压级信号，并分别对不同转速和不同负载扭矩下的声压级信号进行频谱分析，

如图2和图3所示。从图中可以看出：

保持负载扭矩不变，不同转速时所测到的电机噪声声压级明显不同，并且转速越大，电机噪声声压级越高。

保持转速不变，不同负载下测到的噪声声压级基本一致，当负载增大时，对于某些频率处的噪声声压级幅值稍有增加。

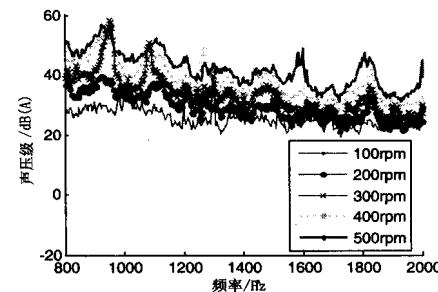


图2 不同转速下的噪声声压级频谱对比

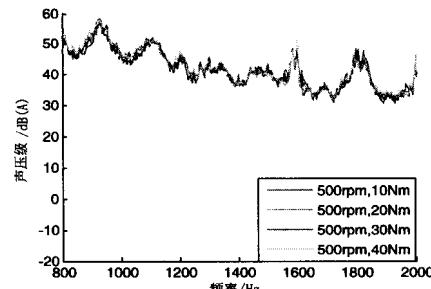


图3 不同负载下的噪声声压级频谱对比

试验结果表明：随着电机转速的增加，电磁噪声的声压级明显增大，而随着负载扭矩的增加，声压级没有明显变化，说明轮毂电机的转速相比于负载扭矩对电磁噪声的影响更大。

为了分析产生上述现象的机理，将在第二节进行轮毂电机电磁噪声多物理场建模，在第三节进行轮毂电机多工况下的电磁噪声仿真计算，对上述试验现象进行解释。

2 轮毂电机电磁噪声多物理场建模

2.1 轮毂电机径向力波计算

按照电机电磁噪声的求解思路，首先应计算在实际工况下的径向电磁力波，再计算由电磁力波引起的电机结构振动响应，最后计算辐射噪声。

本节采用有限元的方法，在Ansoft中建立电机的二维磁场模型，对径向力波进行求解。电机参数如表1所示。

制造业自动化

表1 轮毂电机参数

参数	数值	参数	数值
定子槽数/-	27	定子齿距/mm	26.36
极对数/-	12	永磁体剩磁/T	1.04
气隙长度/mm	0.54	短距系数/-	0.8889
槽口宽度/mm	6.0	绕组层数	2

由于气隙是永磁同步电机磁场转换和能量储存的重要模块，其网格精度对有限元仿真计算结果有重要影响。对模型进行有限元网格划分时，将气隙分层加密，如此可以大大提高计算精度。选取转速为500rpm、负载20.8Nm，采用正弦波供电，计算气隙磁场的时间历程，根据公式：

$$P(t) = \frac{B^2(t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

求解径向力波，其中 $P(t)$ 表示径向力波时间历程， $B(t)$ 表示磁场时间历程， μ_0 为真空磁导率。图4和图5分别为转速为500rpm、负载20.8Nm时的径向力波的时域图和频谱图。

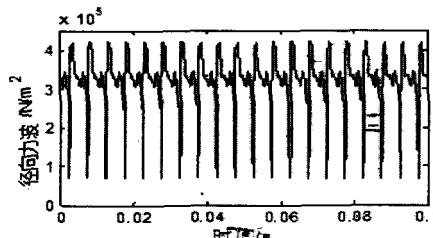


图4 径向力波时域图

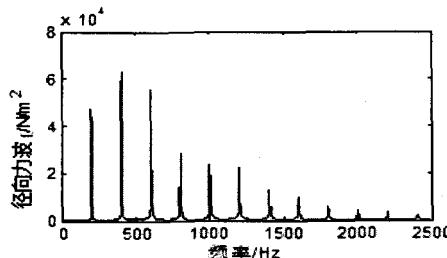


图5 径向力波频谱图

当电机转速为500rpm，对应电流基频 $f_0=100\text{Hz}$ ，从图5中可以看出，径向力波峰值频率为电流基频的偶数倍。

2.2 轮毂电机结构有限元建模及频率响应分析

轮毂电机由于采用外转子驱动，电磁噪声主要由外转子的振动引起。为分析外转子的振动特性，利用ANSYS建立轮毂电机结构有限元模型，对外转子进行模态分析，获得其模态频率，如表2所示。

表2 电机模态频率

模态阶数	模态频率(Hz)	模态阶数	模态频率(Hz)
1	1883	5	6210
2	3295	6	7228
3	3858	7	7763
4	6180	8	9129

由于径向力波在空间上呈周期性分布，周期数为单元电机个数，对于目标电机而言，空间周期数为3。在时间上亦呈周期性分布，周期数为磁极对数。在有限元模型中将空间上呈三个周期分布的径向力波面载荷均匀加载到转子内表面，进行频率响应计算，提取电机径向外表面处速度信号进行分析。图6为转速500rpm，负载扭矩20.8Nm下的取样点处振动响应的频谱图。

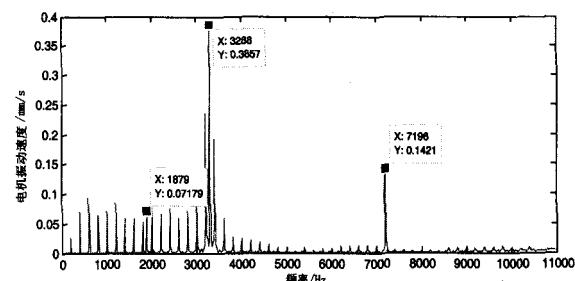


图6 径向外表面节点振动速度频谱

从图6可以看出，径向外表面的振动速度频率成分与径向力波的频率成分基本相同，部分频率处幅值较大，峰值较大的频率对应电机外转子的模态频率，当径向力波的频率接近该频率时，结构发生共振，因此幅值较大。

2.3 轮毂电机噪声边界元仿真

数值声学主要分为声学有限元法和声学边界元法，无论是有限元法还是边界元法，其核心都是求解Helmhotz方程。其中声学有限元法通常用于计算封闭空间中的声场，而声学边界元法不仅可以计算内部声场，还可以计算外部声场。需要研究的是轮毂电机在电磁激励下辐射的噪声，属于外声场，因此采用边界元的方法求解。利用LMS.Virtual.Lab建立轮毂电机边界元模型，场点面网格的建立与试验中距离相一致，布置在距电机表面0.3m的位置处，并选取电机径向方向、两侧端盖方向三个场点作为噪声监测点，图7为转速500rpm，负载扭矩20.8Nm时的声压级频谱图。

制造业自动化

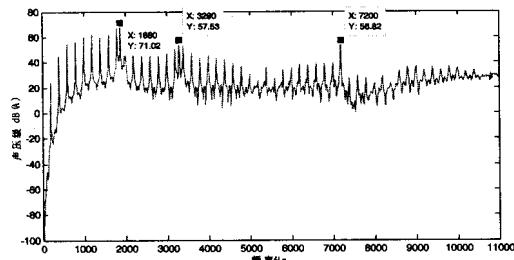


图7 电磁噪声频谱

转速500rpm时，控制电流基频为100Hz，从图中可以看出，电磁噪声的峰值频率为控制电流频率的整数倍，这是因为径向电磁力波的频率为电流基频的整数倍，由此激发的结构振动和辐射噪声与激励力频率一致。

从图7中还能看出，电磁噪声峰值最大的频率分别为1880Hz、3290Hz和7200Hz，均对应轮毂电机外转子的模态频率。轮毂电机受到上述频率的电磁力波的作用，产生结构共振，通过外转子向外辐射较大的电磁噪声。

3 轮毂电机多工况电磁噪声仿真计算

3.1 基于正交试验原理的多工况电磁噪声仿真计算
轮毂电机噪声试验得出结论：电机转速对电磁噪声影响较大，而负载扭矩对其影响较小。为了分析两者对轮毂电机电磁噪声的影响，确定主次因素，采用正交试验的原理进行仿真，针对转速和负载扭矩两个因素进行2因素4水平正交分析，并选取轮毂电机电磁噪声的总声压级信号为评价指标，列出因素水平表如表3所示。

表3 总声压级因素水平表

工况	转速/rpm	负载扭矩/Nm	总声压级/dB (A)
1	500	28	72.39
2	500	53	72.45
3	500	78.2	72.83
4	500	102.5	72.94
5	1000	28	75.63
6	1000	53	76.18
7	1000	78.2	76.64
8	1000	102.5	76.97
9	1500	28	83.89
10	1500	53	84.04
11	1500	78.2	84.27
12	1500	102.5	84.55
13	2000	28	79.07
14	2000	53	79.32
15	2000	78.2	79.62
16	2000	102.5	80.04

采用极差法分析转速与负载扭矩对电磁噪声的影响。首先计算同因素不同水平下的总声压级的均值：

$$\text{极差值} = \text{最大均值} - \text{最小均值}$$

极差值越大表明该因素对评价指标的影响越大。计算两因素的极差值，如表4所示。

表4 极差表

因素	电机转速	负载转矩
极差值	11.54	0.88

从表4中可以看出，转速的极差值大于负载扭矩的极差值，说明转速对电磁噪声的影响大于负载扭矩的影响。图8和图9为不同转速和扭矩下电磁噪声的频谱图。

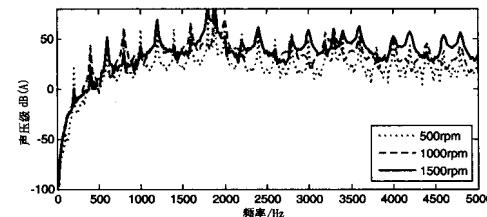


图8 不同转速下声压级频谱

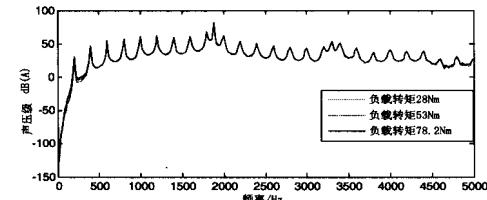


图9 不同负载下声压级频谱

从图8和图9中也能看出，随着电机转速的增加，声压级的升高较明显，而随电机负载扭矩的增加，声压级只有少量的增加，声压级曲线几乎贴合在一起。说明声压级受转速影响较大，受负载扭矩影响较小。

3.2 噪声特性分析

本节分析产生试验和仿真计算中相关现象的原因。因为噪声归根到底由激励力引起，所以应从激励力的角度进行探究。首先对不同转速和负载扭矩下的径向电磁力波进行频谱分析，如图10和图11所示。

由表2可知，轮毂电机的模态频率较高，最低阶频率也接近2000Hz。而根据图10和图11，在负载扭矩不变时，随着电机转速的升高，径向力波的峰值频率向高频方向移动，转速为500rpm

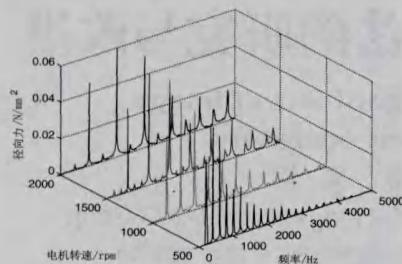


图10 不同转速下的径向力波频谱图

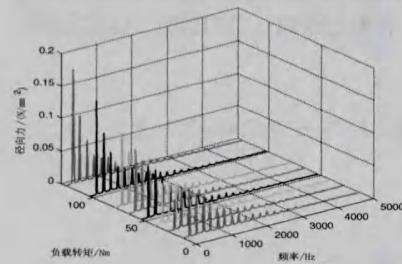


图11 不同负载下的径向力波频谱

时, 径向力波基本集中在低频段, 2000Hz以上的幅值很低, 3000Hz以上的成分几乎为零, 但转速为2000rpm时, 径向力波峰值频率分布较宽, 到5000Hz还有幅值较高的峰值频率分布。而当转速不变时, 随着负载扭矩的增加, 径向力波只是在峰值频率处的幅值有所增加, 而频率分布几乎没有发生改变, 而且基本集中在低频段。所以转速越大, 径向力波所覆盖的外转子模态频率越多, 更容易激发结构共振, 产生的噪声辐射也就越明显, 总声压级也就越高。而随着负载扭矩的增加, 径向力波频率成分不变, 只是在峰值频率处的幅值稍有增加, 因而引起电机结构共振较少, 产生的电磁噪声声压级只有少量的增加。

由于该轮毂电机为永磁同步电机, 通过改变电流频率对转速进行控制, 转速变大意味着电流频率增大, 而电流频率的增大会导致径向力波的频率增大, 所以会出现图10所示的随转速变大, 径向力波向高频方向移动的现象。由于电机的模态频率较高, 所以径向力波的高阶谐波对电磁噪声的影响较大, 低阶谐波对电磁噪声影响不明显, 通过对不同负载下的径向力波进行谐波分析, 如图12所示, 可以看出径向力波低阶谐波幅值随负载增加较快, 高阶谐波幅值随负载增加不明显, 因此负载扭矩对电磁噪声的总声压级影响不大。

4 结论

针对外转子轮毂电机低速大扭矩的特点, 设计了一种简单有效的测试轮毂电机电磁噪声的新

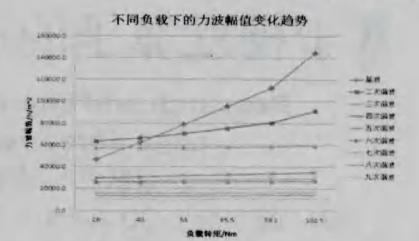


图12 不同负载下径向力波幅值变化趋势

方法, 该测试方法可以方便地对不同负载扭矩下的外转子电机进行噪声测试, 并进行了不同转速和负载扭矩下的噪声试验。通过对轮毂电机的径向力波进行仿真计算, 并将其作为激励力, 计算外转子振动的频率响应, 进而计算噪声辐射, 分析了转速和负载对电磁噪声的影响。

研究发现, 轮毂电机转速对电磁噪声影响较大, 而负载扭矩对其影响不明显。这是由于电机外转子模态频率较高, 转速升高使径向力波频率增大, 因此容易引起结构共振, 增大噪声辐射; 而负载扭矩的增加不改变径向力波的频率成分, 只会使得低频段径向力波的幅值稍有增加, 因此对电磁噪声影响不明显, 声压级略有增大。

参考文献:

- [1] 孙庆.轮毂电机径向力波对电磁噪声影响研究[D].上海:同济大学,2013.
- [2] 褚文强,辜承林.电动车用轮毂电机研究现状与发展趋势[J].电机与控制应用,2007,34(4):1-5.
- [3] 黄开胜,张城生,杨杰.笼型感应电动机电磁噪声控制方法与效果[J].广东机械学院学报,1997,15(1):21-26.
- [4] 何昌.电动汽车用永磁直流无刷驱动电机电磁噪声研究[D].上海:同济大学,2012.
- [5] 王再宙,张承宁,宋强.基于声强技术电动汽车电机系统噪声试验研究[J].中国电机工程学报,2007,27(z1):98-100.
- [6] 张碧英,曹剑绵.800kW感应电机的振动噪声的试验分析[J].电工技术学报,1994,4:5-9.
- [7] Herbert De Gersem,Karel De Brabandere, Ronnie J.M.Belman et al. Motional Time-Harmonic Simulation of Slotted Single-Phase Induction Machines[J]. IEEE Transactions On Energy Conversion, 2002,17(3): 313~318.
- [8] 伍先俊,李志明.汽车电机噪声机理和降噪方法[J].微特电机,2003,1:14-16.
- [9] 宫海龙.高转矩永磁轮毂电机磁系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [10] 何融.车用直流无刷电机径向力波分析[D].上海:同济大学,2011.
- [11] 黄礼文,王宗培.电动机噪声理论和控制技术的进展[J].电工技术学报,2000,15(5): 34-38.
- [12] 彭连云,宋强,王再宙.基于声阵列混合动力电动客车电机系统噪声测试研究[J].微电机,2011,4(1):90-92.