

车用异步电机的电磁噪声分析与抑制^{*}

郑江, 代颖, 石坚

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 分析车用异步电机的电磁噪声问题。分析一台电动汽车牵引用异步电机空载噪声过大的原因, 定位噪声的主要来源。基于 Ansys Workbench 多物理场仿真分析平台建立样机的电磁-结构-声场仿真模型, 对样机的电磁噪声进行仿真预测, 并通过试验测试和有限元仿真的噪声频谱对比验证电磁噪声仿真的正确性。对样机电磁噪声过大的原因进行理论分析, 通过更改槽配合抑制电磁噪声, 并通过噪声测试验证理论分析的正确性。

关键词: 电磁噪声; 多物理场有限元法; 电磁力波; 槽配合; 异步电机

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0074-05

Analysis and Suppression of Electromagnetic Noise of Asynchronous Motor for Electric Vehicle^{*}

ZHENG Jiang, DAI Ying, SHI Jian

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Electromagnetic noise of induction motor was studied. The reason of an electric vehicle traction induction motor having larger no-load noise was analyzed, and the main sources were positioned. Based on the Ansys Workbench multi-physical field simulation analysis platform, the electromagnetic-structure-acoustic field simulation model was established, the electromagnetic noise of the prototype was predicted. Through the noise spectrum of experimental test comparing with the finite element simulation, the correctness of the simulation analysis of electromagnetic noise was verified. Theoretical analysis of the electromagnetic force wave, which caused the noise of the prototype was carried out, and the electromagnetic noise was suppressed by changing the stator and rotor slot, and the correctness of the method was verified by the noise test.

Key words: electromagnetic noise; multi physical field finite element method; electromagnetic force wave; slot combination; asynchronous motor

0 引言

异步电机是电动汽车驱动电机的主要类型之一, 由于成本低、可靠性高、易弱磁等特点, 在大功率驱动场合有很广泛的应用, 如美国特斯拉电动车牵引用电机就采用了异步电机。电动汽车用电机在设计时增大电磁负荷的同时尽量减小体积和重量, 从而导致电磁力增大而结构刚性变小, 容易

产生较大的电磁噪声问题。相比于传统汽车, 电机噪声是车内噪声的主要来源, 且电磁噪声频率处在人耳敏感范围之内, 对整车的 NVH 性能影响较大。因此研究车用电机的电磁噪声问题对提升电动汽车的产品性能具有重要意义^[1-3]。

异步电机中主磁通大致沿径向进入气隙, 并在定转子产生径向力, 从而引起电磁振动和噪声^[4]。电机的电磁噪声是一个复杂的问题, 涉及

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51007050; 51507097)

作者简介: 郑江(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机设计、电机多物理场仿真。

代颖(1980—), 女, 副教授, 研究方向为电机的振动噪声、电动汽车牵引用电机设计。

石坚(1974—), 男, 研究方向为高性能电机及其驱动控制方法。

磁场、振动和声场等方面。目前国内外已有学者针对电机的噪声问题进行多物理场研究^[5-9]。

本文利用多物理场有限元仿真与试验结合的方法研究异步电机的噪声问题并提出抑制方法。首先对一台样机进行噪声测试,发现存在很大的电磁噪声,通过多物理场有限元分析其成因,并通过仿真与试验对比验证仿真的正确性。然后分析不同槽配合方案的电磁力波特性,通过选取合适的槽配合抑制电磁噪声。最后通过多物理场仿真和试验测试证明方法的正确性。

1 车用异步电机试验研究

本文针对一台异步电机进行试验研究,样机如图 1 所示。



图 1 样机照片

样机为 3 相 4 极电机,额定功率 40 kW,定转子槽数为 36/30。利用丹麦 B&K 公司的 BK2238 噪声计和南京安正 CRAS 信号分析系统在自制的半消音室中对样机进行噪声测试。为了减小背景噪声干扰,获得更清晰的噪声信号频谱,选择测试时间为深夜,同时噪声测试点距离电机机身选择 30 cm,而不是鉴定性噪声试验标准中的 1 m。测试时将控制器等其他声源设备放置于半消音室外。噪声测试结果如图 2 所示。

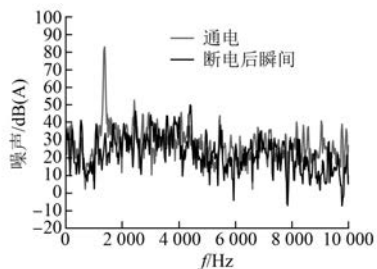


图 2 样机通断电前后噪声频谱对比

图 2 为样机在 2 400 r/min 空载工况下进行

测试,得到通电时和断电后瞬间噪声频谱对比结果。测试中当电机通电时存在很大啸叫声,根据频谱结果显示最大噪声点出现在 1 367.2 Hz 处,断电后瞬间该频率点噪声分量消失。在电机中电磁变化过程比机械变化过程快得多,断电后瞬间由电磁引起的振动和噪声消失,但由于惯性作用电机速度来不及下降,机械等其他原因产生的噪声还保留着。由此可以判定样机噪声的主要来源是电磁噪声。

2 电磁噪声多物理场仿真

电机的电磁噪声问题,可以通过多物理场仿真平台 Ansys Workbench 搭建多物理场模型进行分析,仿真流程如图 3 所示。



图 3 电机电磁振动噪声仿真流程

通过二维电磁有限元仿真得到随时间变化的电磁力的大小,然后通过傅里叶变换得到频域下的结果;在结构场中通过模态分析得到定子结构的固有频率特性,将电磁力作为激励添加在定子齿部,从而仿真定子电磁力作用下的振动响应;最后建立辐射区域的声场模型,将振动响应结果作为声场分析的激励,从而可以分析噪声辐射区域的声场结果。

2.1 电磁力分析

建立样机电磁场的 2D 有限元仿真模型,如图 4 所示。

通过有限元仿真得到车用异步电机运行区域各工作点的电磁场分析结果,再通过后处理得到气隙中磁密的径向和切向分量。根据麦克斯韦张量法计算作用于定子铁心结构的径向和切向电磁激励力密度,如式(1)、式(2)所示^[8]:

$$f_{\text{rad}} = \frac{1}{2u_0}(b_n^2 - b_t^2) \quad (1)$$

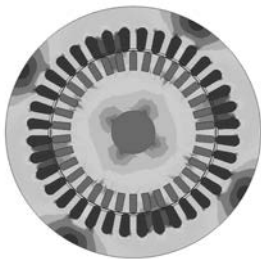


图4 样机电磁场模型

$$f_{\tan} = \frac{1}{u_0} (b_n b_t) \quad (2)$$

电磁力主要集中在定子齿上,沿定子齿面对力密度进行积分可以得到作用在定子齿上的电磁力。

2.2 结构振动仿真

定子结构振动模型如图5所示。

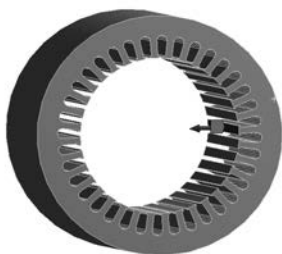


图5 定子结构振动模型

通过电磁分析可以得到各个齿部随时间变化的径向和切向电磁力,将时域下的电磁力通过傅里叶分解转换到频域下,作为振动分析的激励源添加到相应的齿部,进行结构振动仿真,得到定子结构振动响应。

2.3 声场仿真

根据测试距离建立半径为 0.3 m 的圆柱面空气域模型来模拟噪声辐射区域,将定子外表面的速度响应结果作为声场分析的激励施加到空气域的内圆表面从而得到声场仿真结果。图6为 2 400 r/min 空载工况下噪声辐射区域外表面 A 级权声压级最大值结果。

通过仿真与试验结果对比可以看出,仿真电磁噪声最大频率点出现在 1 360 Hz 处,与实测点 1 367.2 Hz 基本一致。该频率点的仿真值 [96.15 dB(A)] 大于实测值 [83.01 dB(A)],这是由于仿真时采用了定子理想化模型,对一些结构

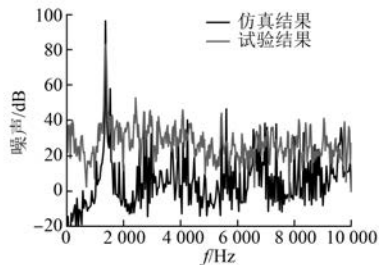


图6 试验与仿真的空载噪声频谱对比

做了简化忽略处理,而且后处理中噪声取值为空气域外表面的最大值而不是平均值。对于其他频率点,实测噪声大于仿真结果,这是由于仿真结果只考虑电磁噪声,而实测噪声不仅包含了机械噪声,同时由于测试处于半消音室中,背景噪声有一定干扰。通过对比,认为多物理场电磁噪声仿真可以准确地预测电磁噪声出现的频率点。图7为工况 2 400 r/min 空载下 1 360 Hz 频率点的声压云图和声压级云图。

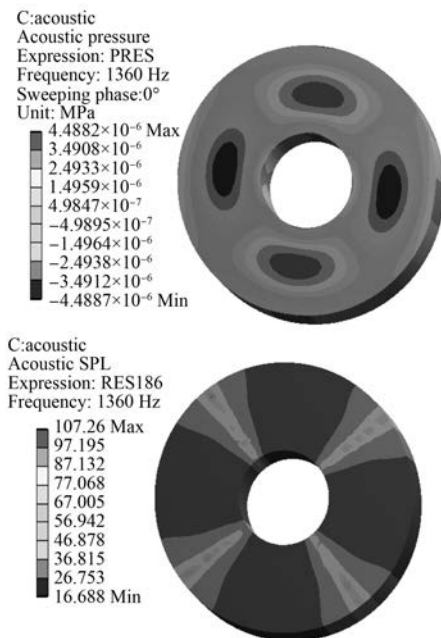


图7 样机在 1 360 Hz 下的声压云图和声压级云图

从图7可以看出声压分布与 2 阶模态振型一致,可以判断该频率点的噪声是由 2 阶电磁力波引起的。

3 电磁噪声的抑制

3.1 电磁力波表

异步电机气隙中的电磁力波阶数 n 为^[10]

$$n = |\mu \pm \lambda|p \tag{3}$$

式中： μ, λ ——定转子谐波次数；
 p ——电机极对数。

根据式(3)计算 36/30 槽配合和 36/44 槽配合的电磁力波如表 1、表 2 所示。当产生电磁力波的磁场谐波次数较大时,其磁场幅值较小可以不考虑;而当力波阶次较大时,定子的刚性好,振动和噪声的幅值较小,也可以忽略。表 1、表 2 中列出了阶次小于 10 的电磁力波^[11-13]。

从表 1 可知,除 0 阶力波外,36/30 槽配合最低阶力波为 2 阶,而 36/44 槽配合最低阶力波为 4 阶。对于同一定子结构 4 阶模态固有频率比 2 阶模态固有频率更高,更不易引起振动。所以 36/44 槽配合相比于 36/30 槽配合可以较好地削弱噪声。

表 1 36/30 槽配合电磁力波表

定子谐波	转子谐波					
	-14	16	-29	31	-44	46
-11	6	10	-	-	-	-
13	2	6	-	-	-	-
-17	6	2	-	-	-	-
19	10	6	-	-	-	-
-29	-	-	0	4	-	-
31	-	-	4	0	-	-
43	-	-	-	-	2	6

表 2 36/44 槽配合电磁力波表

定子谐波	转子谐波				
	-21	23	-43	45	-65
19	4	8	-	-	-
-23	4	0	-	-	-
25	8	4	-	-	-
-41	-	-	4	8	-
43	-	-	0	4	-
-47	-	-	8	4	-
-65	-	-	-	-	0

3. 2 改进方案电磁噪声仿真结果

将 36/44 槽配合作为改进方案,通过多物理场仿真得到空载工况下的噪声结果,如图 8 所示。

与原样机仿真结果对比:改进后方案电机的声压级最大频率点出现在 7 040 Hz,该频率大于

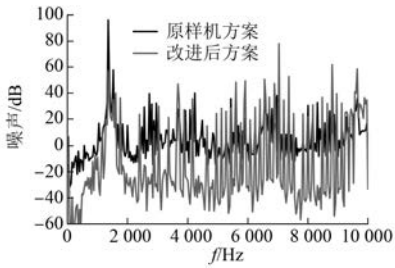


图 8 改进后电机和原样机电磁噪声仿真频谱对比

原样机的幅值最大的频率点,同时声压级幅值大大减小。

声压级求和公式如式(4)所示^[8]:

$$L = 10\lg\left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1L_i}\right) \tag{4}$$

式中： L_i ——各个频率下的声压级值；
 n ——频率点的个数。

根据声压级求和公式计算改进后电机电磁噪声计算值为 78.07 dB,原样机电磁噪声计算值为 96.15 dB。改进后方案电磁噪声仿真结果相对于原样机下降 18.08 dB。图 9 为 36/44 槽配合电机在最大幅值频率点(7 040 Hz)的声压云图和声压级云图。

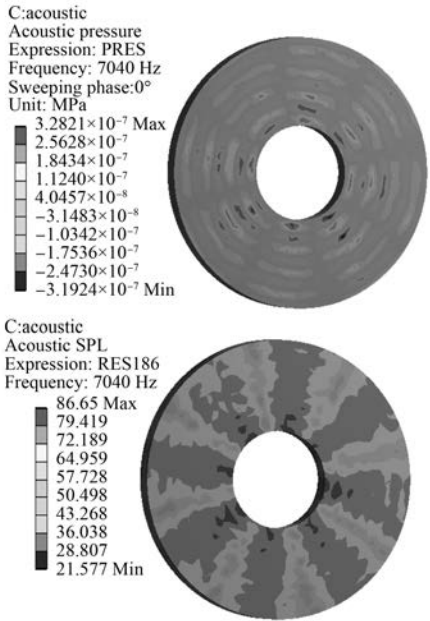


图 9 改进后电机在 7 040 Hz 下声压和声压级云图

从图 9 可以看出,声压分布与 4 阶模态振型一致,可以判断振动主要由 4 阶电磁力波引起,该结论与电磁力波表的分析一致。

3.3 改进方案样机噪声测试结果

重新制造一台 36/44 槽配合样机, 并对其进行噪声测试, 结果如图 10 所示。

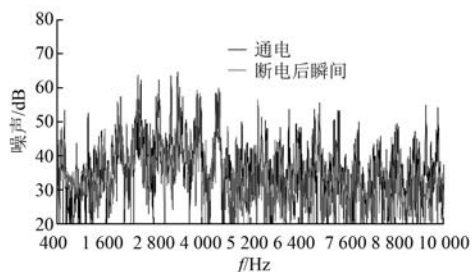


图 10 改进后样机通断电前后噪声频谱对比

采用突然断电法测试 36/44 槽配合电机在 2 400 r/min 空载工况下噪声频谱。对比发现通电情况下和断电后瞬间噪声频谱分布变化不大, 不存在较为尖锐的电磁噪声分量。试验证明通过改变转子槽数可以消除 2 阶电磁力波引起的电磁噪声分量, 从而抑制电机的噪声水平。

4 结 语

本文研究了异步电机的电磁噪声抑制问题。通过对样机的测试发现其存在很大噪声问题, 并定位造成噪声较大的主要原因是电磁噪声。多物理场有限元仿真分析出主要是由 2 阶电磁力波引起的, 并通过试验与仿真的噪声频谱对比验证多物理仿真电磁噪声的有效性。通过电磁力波理论分析改变电机转子槽数后电机中不存在 2 阶电磁力波, 可以消除该阶电磁力波引起的噪声分量。多物理场仿真显示改进后方案电磁噪声值相比原方案下降了 18.08 dB(A), 试验测试也显示不存在明显的电磁噪声分量, 从而证明了该噪声抑制方法的有效性。

多物理场仿真可以准确预测电磁噪声最大的频率点, 同时验证噪声抑制方法的有效性, 对于在电机设计阶段研究噪声的抑制有很大帮助。

【参 考 文 献】

- [1] EHSANI M. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles-fundamentals, theory, and design, second edition[J]. Crc Press, 2009, 23(10): 949-966.
- [2] GOSS J, POPESCU M, STATON D. A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application [C] // Electric Machines & Drives Conference, 2013: 220-225.
- [3] YANG Z, SHANG F, BROWN I P, et al. Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 245-254.
- [4] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
- [5] 张维, 黄坚, 李志强. 异步电机电磁噪声国内外研究现状[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(9): 1-4.
- [6] 狄冲, 鲍晓华, 王汉丰, 等. 感应电机混合偏心情况下径向电磁激振力的研究[J]. 电工技术学报, 2014(S1): 138-144.
- [7] 杨萍, 代颖, 黄苏融, 等. 基于有限元法的车用永磁同步电机电磁噪声的评估[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(9): 33-37.
- [8] BESNERAIS J L, LANFRANCHI V, HECQUET M, et al. Prediction of audible magnetic noise radiated by adjustable-speed drive induction machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4): 1367-1373.
- [9] BESNERAIS J L, LANFRANCHI V, HECQUET M, et al. Characterization and reduction of magnetic noise due to saturation in induction machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(4): 2003-2008.
- [10] JACEK F, WANG C, LAI J C. Noise of Polyphase Electric Motors[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [11] 代颖, 张千帆, 宋立伟, 等. 抑制车用异步电机电磁噪声的槽配合[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 32-35.
- [12] 代颖, 崔淑梅, 张千帆. 车用异步电机的电磁振动/噪声分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 89-97.
- [13] 贺玉民, 史建萍, 崔伟, 等. 槽配合对异步电机电磁噪声的影响分析[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(4): 34-36.

收稿日期: 2016-12-12