

基于波形重构法的永磁电机 电磁振动噪声计算研究*

黄厚佳¹, 李全峰^{1,2}, 徐余法^{1,3}

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306; 2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;
3. 上海第二工业大学, 上海 201209)

摘 要: 提出了基于波形重构法的径向气隙磁密和径向电磁力波解析计算方法, 简化了永磁电机电磁振动和噪声 (EVAN) 的计算过程, 解决了永磁电机径向电磁力波计算较为复杂的难题。首先介绍了波形重构法计算永磁电机 EVAN 的理论依据。然后, 以 1 台永磁电机为例, 详细介绍了运用波形重构法计算永磁电机电磁振动噪声的具体步骤。最后, 对电机 EVAN 进行多物理场有限元仿真, 将波形重构法计算结果与有限元仿真结果对比, 在误差允许范围内二者的计算结果具有一致性, 由此验证了波形重构法计算电机 EVAN 的准确性。

关键词: 永磁电机; 电磁振动和噪声; 波形重构法; 有限元仿真

中图分类号: TM 301.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)05-0011-06

Calculation of Electromagnetic Vibration and Noise of Permanent Magnet Motor by Waveform Reconstruction Method*

HUANG Houjia¹, LI Quanfeng^{1,2}, XU Yufa^{1,3}

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;
2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
3. Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: An analytical method of calculating the radial airgap flux density and electromagnetic force wave based on waveform reconstruction method was proposed, which simplified the calculation process of electromagnetic vibration and noise (EVAN) of permanent magnet motor and solved the complex problem of calculating the radial electromagnetic force wave of permanent magnet motor. Firstly, the theoretical basis of waveform reconstruction method to calculate EVAN of permanent magnet motor was introduced. Then, taking a permanent magnet motor as an example, the steps of calculating the EVAN of permanent magnet motor using waveform reconstruction method were introduced in detail. Finally, the multi-physical field finite element simulation of EVAN of the permanent magnet motor was carried out, and the calculation results of waveform reconstruction method were compared with those of finite element simulation results. Within the allowable range of error, the calculation results of the two methods were consistent, which verified the accuracy of waveform reconstruction method in calculating the EVAN of permanent magnet motor.

Key words: permanent magnet motor; electromagnetic vibration and noise (EVAN); waveform reconstruction method; finite element simulation

* 基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAG03B00)

作者简介: 黄厚佳(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机优化设计。

李全峰(1982—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电机振动噪声、新型电机设计。

徐余法(1964—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电机故障诊断、智能算法。

0 引言

永磁电机具有质量轻、体积小、效率高以及调速特性优良等优点,因此使用范围广泛,涉及国民经济的各个部门。电机的振动噪声水平反映了电机的设计和制造水平,是衡量性能的一项重要指标。电磁振动噪声是电机振动噪声的主要来源之一,在电机设计阶段对电机运行过程中可能产生的电磁振动噪声进行准确预测并进行相应优化,对于抑制永磁电机的振动噪声具有重要意义^[1-2]。

针对电机的电磁振动噪声问题,国内外学者已经进行了大量研究。作用在定子铁心上的径向电磁力是产生电机电磁振动噪声的根源,文献[3-5]运用解析法深入分析了永磁电机电磁力波特性,推导了径向电磁力波的幅值、频率和空间阶次解析表达式,上述研究为电机电磁振动噪声的解析计算分析奠定了基础,但是给出的力波分量数目过于庞大,因此对后期电磁振动噪声的分析带来一定困难。文献[6-8]研究了极槽配合对永磁同步电机振动噪声的影响,发现选取适当的极槽配合避免低阶电磁力波的产生可有效降低电机振动噪声,并通过有限元仿真及试验验证了结论的正确性。文献[9]研究了不同的控制策略对永磁同步电机电磁振动噪声的影响,提出一种低振动噪声的控制策略。文献[10-11]对永磁同步电机的噪声源进行了深入研究,以此为依据提出了永磁电机电磁振动噪声的预测和诊断方法。随着计算机技术的发展,越来越多的学者开始运用基于有限元的多物理场对永磁电机的电磁振动噪声进行分析,文献[12-13]详细介绍了永磁同步电机电磁场、温度场、结构场、声场的建模过程,并对各种物理场进行耦合,建立了永磁同步电机多物理耦合场的集总模型,对电机的电磁振动噪声进行计算,通过相应的振动噪声试验验证了计算结果的精确性。

针对永磁同步电机电磁振动噪声的计算方法,主要分为有限元法和解析法。有限元法在计算准确性上优于解析法但会耗费大量计算时间。解析法虽然在计算精确性上不如有限元法,但是能够直观建立电机电磁振动噪声和相关设计参数的内在联系并能够对电磁振动噪声进行快速计算,有利于对电机的电磁振动噪声进行分析和优化。

根据现有文献,在运用解析法对电机进行电磁振动噪声分析计算时,需要对电机的径向电磁力波的解析表达式进行推导,但推导出的解析表达式过于复杂,给后期电磁振动噪声的分析带来了一定困难。针对上述问题,本文提出运用波形重构法对永磁电机的电磁振动噪声进行快速计算预测。以1台永磁电机为例,分别运用本文提出的波形重构法和有限元法对电磁振动噪声进行计算,对二者计算结果进行比较,验证波形重构法计算的准确性。

1 永磁电机径向电磁力波时空分布波形重构

在电机运行过程中,作用在定子齿上的径向电磁力波可以分解为一系列旋转的简谐波。传统的径向电磁力波计算方法先对径向电磁力波幅值、空间阶次和频率的解析表达式进行推导,然后代入具体参数,将阶次和频率相同的力波分量进行矢量叠加,得到具有不同空间阶次和频率的力波分量。解析表达式推导出的分量数量较大,在矢量合成中容易遗漏部分力波分量,并且矢量合成计算量也较大,因此不容易进行后续振动噪声计算。

所谓波形重构法是根据相关电磁场理论,构建径向气隙磁密时空分布波形,运用麦克斯韦张量方程进一步得到径向电磁力波的时空分布波形。然后对求取的径向电磁力波时空分布波形进行二维傅里叶变换,得到各力波分量的幅值、空间阶次和频率。最后,运用求取的各力波分量对电机的电磁振动噪声进行计算。

电机运行过程中产生的径向电磁力波表达式可近似表示为^[14]

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

式中: $B_n(\theta, t)$ ——径向气隙磁密;

μ_0 ——真空磁导率。

径向气隙磁密表达式为

$$B_n(\theta, t) = \left[\sum_{\mu} f_{\mu}(\theta, t) + \sum_{\nu} f_{\nu}(\theta, t) \right] \lambda(\theta) \quad (2)$$

式中: $\lambda(\theta)$ ——单位面积气隙磁导;

$f_{\mu}(\theta, t)$ ——永磁体产生的 μ 阶磁动势;

$f_{\nu}(\theta, t)$ ——电枢电流产生的 ν 阶磁动势。

上述三者的解析表达式分别为

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 + \sum_l \lambda_l(\theta) \tag{3}$$

$$f_\mu(\theta, t) = F_\mu \cos(\mu p \theta - \mu \omega_1 t) \tag{4}$$

$$f_\nu(\theta, t) = F_\nu \cos(\nu p \theta - \omega_1 t - \varphi_\nu) \tag{5}$$

式中： p ——电机极对数；
 $\lambda_0、\lambda_l$ ——单位面积磁导的直流分量和 l 次谐波分量,其中 $l=1,2,3,\cdots$;
 F_μ ——永磁体产生的 μ 阶磁动势幅值;
 $F_\nu、\varphi_\nu$ ——电枢电流产生的 ν 阶磁动势幅值与滞后永磁体磁动势的电角度。

文献[3]对 $\lambda_0、\lambda_l、F_\mu、F_\nu、\mu、\nu$ 的计算公式已进行了详细叙述,不再赘述。因此,当电机的参数确定时,给定变量 θ 和 t 的值可确定 t 时刻 θ 处的径向气隙磁密和电磁力波的数值。

设 θ 的取值范围为 $0\sim2\pi$, t 的取值范围为 $0\sim T$,其中 T 为电机稳态运行时旋转一圈所用的时间。 T 计算公式为

$$T = \frac{n}{60} \tag{6}$$

式中： n ——电机稳态运行时的速度。

在 θ 与 t 各自的取值范围内分别取 N_1 和 N_2 个点,使点间距分别为 $\Delta\theta$ 和 Δt ,二者的计算公式分别为

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{N_1 - 1} \tag{7}$$

$$\Delta t = \frac{T}{N_2 - 1} \tag{8}$$

依次计算 $\theta=i\cdot\Delta\theta, t=j\cdot\Delta t$ 时径向气隙磁密 $B_n(\theta, t)$ 和电磁力波 $p_n(\theta, t)$ 的大小,其中 $i=1,2,\cdots,N_1; j=1,2,\cdots,N_2$ 。以 θ 为 x 轴, t 为 y 轴, $B_n(\theta, t)$ 或 $p_n(\theta, t)$ 为 z 轴,可以得到电机稳态运行时径向气隙磁密或磁力波的时空分布波形。

以 1 台永磁同步电机为例,运用上述方法对负载运行下的径向气隙磁密和电磁力波进行重构,结果如图 1 和图 2 所示。电机基本参数如

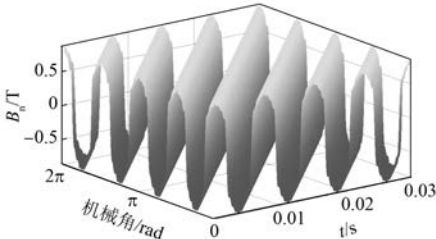


图 1 波形重构法求取的径向气隙磁密时空分布波形

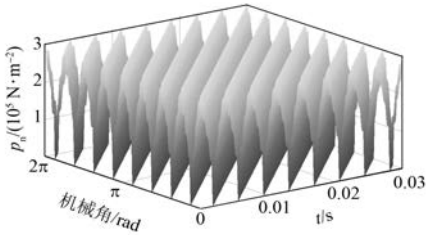


图 2 波形重构法求取的径向电磁力波时空分布波形

表 1 所示。

表 1 电机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	4.2	额定转速/(r·min ⁻¹)	2 000
定子槽数	36	气隙长度/mm	1.5
定子外径/mm	123	铁心长度/mm	110
定子内径/mm	81	永磁体厚度/mm	3.6
极数	8	极弧系数	0.925

运用二维快速傅里叶变换 (FFT),对径向电磁力波的时空分布图进行分解,最终得到各径向电磁力波分量的幅值、空间阶次和频率。图 3 所示为经快速傅里叶变换后的力波空间阶次和频率分布图。

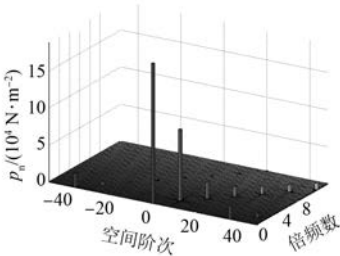


图 3 径向电磁力波阶次和频率分布

运用波形重构法求取径向电磁力波各分量幅值、空间阶次以及频率的流程可用图 4 表示。

2 波形重构法计算永磁电机电磁振动噪声

将所求得的各力波分量作为激励源加载到定子铁心上,可对电机运行过程中产生的电磁振动和噪声进行计算。根据文献[14]中电机电磁振动噪声的计算流程,分别对电机额定工况运行时的电磁振动加速度和噪声的相对声压级的频谱进行计算。

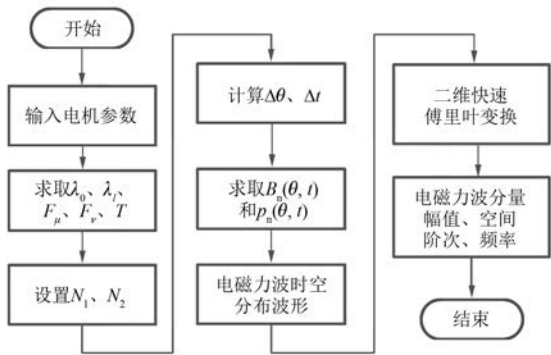


图4 波形重构法计算径向电磁力波的流程

通常铁心振动的幅值与力波空间阶次的四次方成反比^[14],空间阶次越高,产生的电磁振动和噪声越小,因此可以忽略空间阶次高的力波分量。现有文献一般仅考虑空间阶次不高于4的力波分量。由于示例中基波磁密产生的空间阶次为8的力波分量幅值较大,将计算范围扩大到空间阶次不高于8的电磁力波分量。

由第1节可知,对图2中的径向电磁力波时空分布波形进行二维快速傅里叶变换后可以求取各力波分量的幅值、空间阶次和频率,从上述力波分量中找到空间阶次小于8的力波分量,其相应力波特性如表2所示,其中 f_1 为基波电流频率。

表2 空间阶次不高于8的力波分量特性			
编号	幅值/(N·m ⁻²)	空间阶次	频率/Hz
1	96 383	8	2 f_1
2	553	-4	8 f_1
3	497	4	10 f_1

将表2中的力波分量依次作为激励源作用于定子铁心,求得定子铁心表面的振动加速度幅值 a 和产生的电磁噪声的相对声压级(SPL),结果如图5和图6所示。

分别将频率相等的电磁振动加速度和噪声声

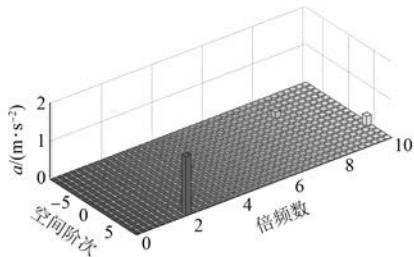


图5 每相电磁力波产生的振动加速度幅值

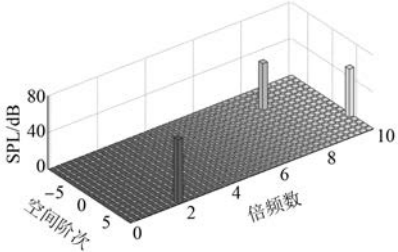


图6 每相电磁力波产生的噪声声压级

压级进行叠加,从而得到振动加速度和噪声声压级的频谱。相应的叠加公式分别为

$$v_k = \sqrt{\sum_{i=1}^m v_{ki}^2} \tag{9}$$

$$L_k = 10 \lg \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m 10^{\frac{L_{ki}}{10}} \right) \tag{10}$$

式中: m ——某一频率下振动加速度或噪声相对声压级不为零的分量个数;

v_{ki} 、 L_{ki} ——单一力波分量产生的振动加速度和噪声相对声压级的幅值;

v_k 、 L_k ——某一频率下振动加速度和噪声相对声压级叠加后的幅值。

图7和图8所示分别为同频率的振动加速度和噪声相对声压级叠加后得到的频谱。

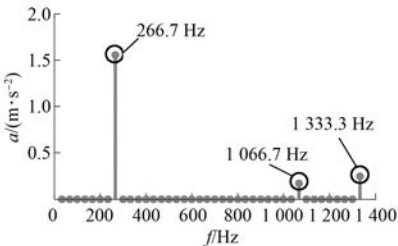


图7 波形重构法求取的振动加速度频谱

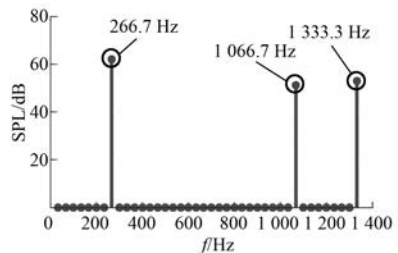


图8 波形重构法求取的噪声频谱

根据表2可知,基波磁密产生的频率为 $2f_1$ (266.7 Hz)的力波分量幅值远大于另外两项力波

分量的幅值,因此频率为 $2f_1$ 的力波所激发的电磁振动加速度幅值远大于另外两项所激发的电磁振动加速度幅值。从图 8 可以看出,尽管后两项力波所激发出的振动较小,但所产生的电磁噪声大,这是由于后两项力波所对应的频率较高。因此,当力波频率较高时,即使幅值较小,所激发出的电磁振动幅值较小,但仍然可以激发出较大的电磁噪声。

与传统电机电磁振动噪声的计算方法相比,运用波形重构法省去了对径向电磁力波展开式的推导以及将空间阶次和频率相同力波进行合成的步骤,简化了计算过程,并且容易编写相关计算程序对电磁振动噪声进行快速计算和分析。

3 有限元仿真验证

为了验证波形重构法在计算永磁同步电机电磁振动和噪声时的准确性,运用 ANSYS Workbench 对表 1 的永磁同步电机运用多物理场耦合对电磁振动噪声开展仿真,将仿真结果与波形重构法的计算结果进行比较。图 9 所示为多物理场耦合仿真数据传递图。



图 9 多物理耦合仿真数据传递图

首先运用 Maxwell 2D 建立电机二维有限元仿真模型,并进行电磁场仿真,求取电机运行过程中产生的径向电磁力。然后在谐响应分析模块中建立定子铁心的三维有限元仿真模型,将电磁仿真计算出的径向电磁力数据加载到定子齿进行电磁振动仿真。最后运用谐响应模块建立电机的噪声仿真模型,将振动仿真数据加载到噪声仿真模型中,对电机电磁噪声进行仿真。图 10 和图 11 所示分别为仿真完成后经后处理得到的某一频率下电机电磁振动和噪声分布云图。

在定子铁心外表面任选一点,提取其对应的振动加速度频谱,结果如图 12 所示。任意选取距铁心中心 0.5 m 处的一点,提取其噪声的相对声压级频谱,结果如图 13 所示。

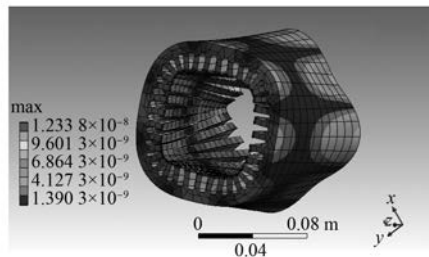


图 10 1066.7 Hz 频率下振动分布云图

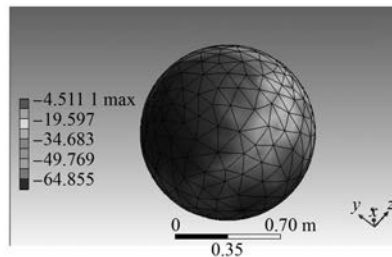


图 11 1600 Hz 频率下噪声分布云图

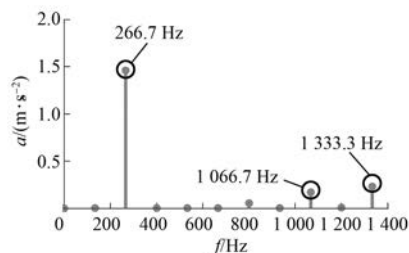


图 12 有限元法求取的振动加速度频谱

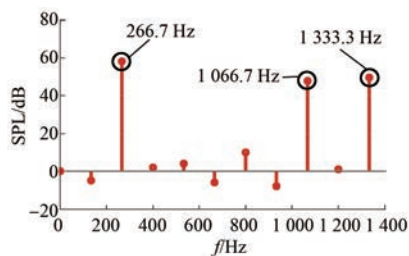


图 13 有限元法求取的噪声频谱

将图 12 和图 13 分别与图 7 和图 8 对比可知,由有限元法求得的电机电磁振动和噪声频谱具有一致性,分别在 266.7、1066.7、1333.3 Hz 时出现峰值。从图 13 明显看出,除上述 3 个明显的峰值外还会出现其他幅值较小的峰值。这是由于在运用有限元计算时直接将力波数据传递到振动计算模型时,在力波计算过程中会用到快速傅里

叶变换,而引入原本不存在的误差分量,所以在计算电磁振动噪声时出现幅值较小的尖峰。因为在波形重构计算时已经将上述力波误差分量去除,所以没有出现由误差分量带来的尖峰。

将由波形重构法和有限元法计算得到的电磁振动与噪声结果进行对比,计算波形重构法相对

于有限元法的相对误差率,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,由波形重构法计算出的结果整体上要大于有限元法的计算结果,这是由于波形重构法计算时忽略了铁心饱和等因素的影响,计算所得的气隙磁密较大,导致振动噪声计算结果也相应变大。

表 3 波形重构法与有限元法计算结果对比

频率/Hz	振动加速度			相对声压级		
	有限元法/(m·s ⁻²)	波形重构法/(m·s ⁻²)	相对误差率/%	有限元法/dB	波形重构法/dB	相对误差率/%
266.7	1.46	1.56	5.49	58.24	61.56	5.38
1 066.7	0.17	0.18	5.26	47.91	50.55	5.23
1 333.3	0.23	0.25	7.41	49.56	53.20	6.74

综上所述,排除计算误差的影响,波形重构法计算出的结果与有限元法的结算结果较为接近,说明所提波形重构计算永磁电机电磁振动噪声的方法具有一定的实用性。

4 结 语

本文提出了运用波形重构法计算永磁电机电磁振动和噪声的方法。详细介绍了波形重构法计算电机电磁振动噪声的理论依据与计算的具体步骤和方法。以 1 台永磁同步电机为例,运用波形重构法对其电磁振动和噪声进行了计算,得到了电磁振动和噪声频谱。将计算结果与有限元仿真结果进行对比,在一定误差范围内波形重构法计算结果与有限元结果具有一致性。运用波形重构方法计算永磁电机电磁振动噪声可以简化径向电磁力波的计算过程,易于进行计算程序的编写,因此具有一定的实用性。

【参 考 文 献】

[1] 唐任远.现代永磁电机:理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2016.

[2] 黄治国,傅丰礼.中小旋转电机设计手册[M].2 版.北京:中国电力出版社,2014.

[3] 张冉.表面式永磁电机电磁激振力波及其抑制措施研究[D].济南:山东大学,2011.

[4] 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.

[5] 张磊,温旭辉.车用永磁同步电机径向电磁振动特性[J].电机与控制学报,2012,16(5): 33.

[6] 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.

[7] ISLAM M S, ISLAM R, SEBASTIAN T. Noise and vibration characteristics of permanent-magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2014,50(5): 3214.

[8] VEREZ G, BARAKAT G, AMARA Y, et al. Impact of pole and slot combination on vibrations and noise of electromagnetic origins in permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2015,51(3): 8101104.

[9] 李晓华,雷轶,刘成建.基于 dSPACE 的永磁同步电机低振动噪声控制策略[J].电机与控制应用,2017,44(12): 47.

[10] 左曙光,刘晓璇,于明湖,等.永磁同步电机电磁振动数值预测与分析[J].电工技术学报,2017,32(1): 159.

[11] 宋志环.车用驱动电机电磁振动噪声源诊断技术[J].电机与控制应用,2018,45(7): 97.

[12] 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.

[13] BRACIKOWSKI N, HECQUET M, BROCHET P, et al. Multiphysics modeling of a permanent magnet synchronous machine by using lumped models [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59(6): 2426.

[14] 陈世坤.电机设计[M].2 版.北京:机械工业出版社,2000.

收稿日期: 2018-11-28