



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112906145 B

(45) 授权公告日 2024.05.14

(21) 申请号 202011426440.5

CN 109214125 A, 2019.01.15

(22) 申请日 2020.12.09

CN 111697892 A, 2020.09.22

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112906145 A

EP 3660522 A1, 2020.06.03

(43) 申请公布日 2021.06.04

高鹏等. 电动汽车用永磁同步电机电磁振动噪声分析及优化. 微电机. 2019, 第52卷(第12期), 全文.

(73) 专利权人 华中科技大学
地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路1037号

Yang Lu 等. Electromagnetic Force and Vibration Analysis of Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Machines. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. 2018, 第54卷(第5期), 全文.

(72) 发明人 卢阳 李健 徐宏伟

Yang Lu 等. Electromagnetic Force and Vibration Study on Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machines With Dual Three-Phase Windings. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. 2020, 第67卷(第1期), 全文.

(74) 专利代理机构 武汉知伯乐知识产权代理有限公司 42282
专利代理师 王福新

林福等. 考虑电流谐波的永磁同步电机电磁振动和噪声半解析模型. 电工技术学报. 2017, (第09期), 全文.

(51) Int. Cl.

G06F 30/17 (2020.01)

G06F 30/23 (2020.01)

G06T 17/20 (2006.01)

G06F 119/14 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 109039215 A, 2018.12.18

审查员 赵玉航

权利要求书3页 说明书8页 附图2页

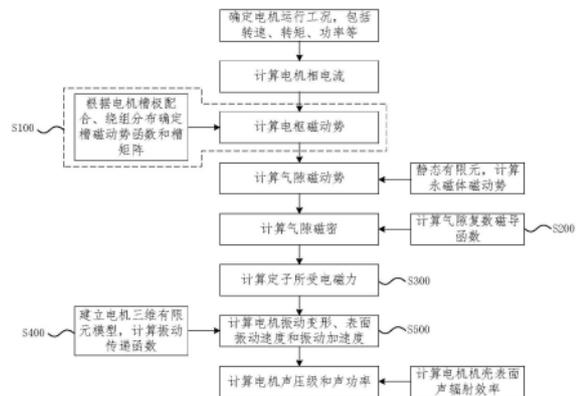
(54) 发明名称

电机电磁力与电磁振动噪声分析及系统

(57) 摘要

本发明公开了一种电机电磁力及电磁振动噪声分析及系统,所述方法包括S100:确定电机的运行工况,获得电机任意时刻的相电流,确定电机的槽磁动势函数和槽矩阵及电机任意时刻的电枢磁动势;S200:建立电机静态有限元模型,并分析该电机永磁体磁动势以及该电机定子和转子的复数气隙磁导函数;S300:获得该电机的气隙磁密,获得所述电机每个定子齿上所受的电磁力;S400:建立电机的三维结构有限元模型,并分析电机的振动传递函数;S500:计算电机在任意电磁力激励下的振动速度和振动加速度,基于振动速度和振动加速度获得电机辐射的声

压级和声功率。本发明可对电机各种工况下的电磁力及电磁振动噪声进行快速评估与分析,大幅提升电机振动噪声计算与优化效率。



CN 112906145 B

1. 一种电机电磁力及电磁振动噪声分析方法,其特征在于,包括如下步骤:

S100: 确定电机的运行工况,根据其运行工况获得电机任意时刻的相电流,根据电机槽极配合、绕组分布确定电机的槽磁动势函数和槽矩阵,并结合所述相电流获得电机任意时刻的电枢磁动势;

步骤S100具体包括:

S101: 确定电机的槽极配合与绕组分布;

S102: 根据所述槽极配合与绕组分布,建立电机槽矩阵;

S103: 建立所述电机的槽磁动势函数;

S104: 根据电机的运行工况,确定电机的相电流瞬时值;

S105: 结合所述相电流瞬时值、电机槽矩阵以及槽磁动势函数获得电机在任意时刻与电流下的电枢磁动势;

所述槽磁动势函数为:

$$N_q(\theta_s) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \theta_s \leq \theta_q - \frac{\Delta\theta}{2} \\ \left[\frac{1}{\Delta\theta} (\theta_s - \theta_q) + \frac{1}{2} \right] & \theta_q - \frac{\Delta\theta}{2} \leq \theta_s \leq \theta_q + \frac{\Delta\theta}{2} \\ 1 & \theta_q + \frac{\Delta\theta}{2} \leq \theta_s \leq 2\pi \end{cases}$$

其中, $N_q(\theta_s)$ 为槽磁动势函数, $\Delta\theta$ 为槽宽, θ_q 为第 q 个槽中心位置, 其计算公式为: $\theta_q = (q-1) \cdot 2\pi/Q_s$, θ_s 为任意时刻转子位置, Q_s 为电机槽数;

其建立的具体规则为: 当电机某个槽内的导体均属于同一相时, 槽矩阵中相应的行和列的元素记为1; 当电机某个槽内的导体不属于同一相时, 槽矩阵中相应的行和列的元素分别记为0.5;

S200: 建立所述电机的静态有限元模型, 并分析获得该电机永磁体磁动势以及该电机定子和转子的复数气隙磁导函数;

S300: 根据所述电枢磁动势、永磁体磁动势及定子和转子的复数气隙磁导函数获得该电机的气隙磁密, 并基于该气隙磁密获得所述电机每个定子齿上所受的电磁力;

S400: 建立所述电机的三维结构有限元模型, 并分析获得电机的振动传递函数;

S500: 根据所述电机定子齿电磁力和振动传递函数, 计算获得所述电机在任意电磁力激励下的振动速度和振动加速度, 基于所述振动速度和振动加速度获得电机辐射的声压级和声功率。

2. 根据权利要求1所述的一种电机电磁力及电磁振动噪声分析方法, 其特征在于, 步骤S200具体包括:

S201 ~ S203: 建立无槽定子和无槽转子有限元仿真模型, 并施加幅值大小为1的恒定虚拟磁动势, 仿真计算定子及转子均无槽时的气隙磁密;

S204 ~ S205: 建立有槽定子-无槽转子有限元模型, 并施加幅值大小为1的恒定虚拟磁动势, 仿真计算定子有槽、转子无槽时的气隙磁密;

S207 ~ S208: 建立无槽定子-有槽转子有限元模型, 并施加幅值大小为1的恒定虚拟磁动势, 仿真计算定子无槽、转子有槽时的气隙磁密;

S206、S209:根据所述定子及转子均无槽时的气隙磁密、定子有槽、转子无槽时的气隙磁密以及定子无槽、转子有槽时的气隙磁密,得到定子和转子的复数气隙磁导函数。

3.根据权利要求2所述的一种电机电磁力及电磁振动噪声分析方法,其特征在于,所述复数气隙磁导函数为:

$$\lambda_r^s = \frac{B_{r,slot}^s B_{r,slotless} + B_{t,slot}^s B_{t,slotless}}{B_{r,slotless}^2 + B_{t,slotless}^2}$$

$$\lambda_t^s = \frac{B_{r,slot}^s B_{t,slotless} - B_{t,slot}^s B_{r,slotless}}{B_{r,slotless}^2 + B_{t,slotless}^2}$$

$$\lambda_r^r = \frac{B_{r,slot}^r B_{r,slotless} + B_{t,slot}^r B_{t,slotless}}{B_{r,slotless}^2 + B_{t,slotless}^2}$$

$$\lambda_t^r = \frac{B_{r,slot}^r B_{t,slotless} - B_{t,slot}^r B_{r,slotless}}{B_{r,slotless}^2 + B_{t,slotless}^2}$$

其中, λ_r^s 和 λ_t^s 分别为定子气隙磁导函数的径向和切向分量; λ_r^r 和 λ_t^r 分别为转子气隙磁导函数的径向和切向分量;

$B_{r,slotless}$ 和 $B_{t,slotless}$ 分别为定子及转子均无槽时的气隙磁密的径向和切向分量;

$B_{r,slot}^s$ 和 $B_{t,slot}^s$ 分别为定子有槽、转子无槽时的气隙磁密的径向和切向分量;

$B_{r,slot}^r$ 和 $B_{t,slot}^r$ 分别为定子无槽、转子有槽时的气隙磁密的径向和切向分量。

4.根据权利要求1所述的一种电机电磁力及电磁振动噪声分析方法,其特征在于,步骤S400具体包括:

S401:确定电机定子铁芯及绕组的等效材料参数;

S402:建立所述电机的三维结构有限元模型;

S403:在电机定子齿上施加幅值为1,沿定子圆周呈周期分布的径向力和切向力;

S404:通过有限元仿真计算得到电机不同齿在单位激振力作用下的振动传递函数。

5.根据权利要求1所述的一种电机电磁力及电磁振动噪声分析方法,其特征在于,步骤S500具体包括:

S502:将定子齿电磁力进行傅里叶分解,得到定子齿电磁力的频谱分布;

S503:将计算得到的各个定子齿上的电磁力谐波和对应齿的振动传递函数求积,将所有齿的计算结果叠加即可得到电机的总振动变形;

S505:基于位移、速度和加速度之间的关系获得电机表面的振动速度和振动加速度。

6.一种电机电磁力及电磁振动噪声分析系统,用于实现如权利要求1-5任一项所述的方法,其特征在于,包括:

电枢磁动势分析模块:用于确定电机的运行工况,根据其运行工况获得电机任意时刻的相电流,根据电机槽极配合、绕组分布确定电机的槽磁动势函数和槽矩阵,并结合所述相电流获得电机任意时刻的电枢磁动势;

复数气隙磁导函数计算模块:用于建立所述电机的静态有限元模型,并分析获得该电机永磁体磁动势以及该电机定子和转子的复数气隙磁导函数;

电磁力计算模块:用于根据所述电枢磁动势、永磁体磁动势及定子和转子的复数气隙磁导函数获得该电机的气隙磁密,并基于该气隙磁密获得所述电机每个定子齿上所受的电

磁力；

振动传递函数分析模块：用于建立所述电机的三维结构有限元模型，并分析获得电机的振动传递函数；

电机振动计算模块：用于根据所述电机定子齿电磁力和振动传递函数，计算获得所述电机在任意电磁力激励下的振动速度和振动加速度；

电机辐射的声压级和声功率计算模块：用于根据所述振动速度和振动加速度获得电机辐射的声压级和声功率。

电机电磁力与电磁振动噪声分析方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于电机振动噪声技术领域,更具体地,涉及一种电机电磁力与电磁振动噪声分析方法及系统。

背景技术

[0002] 电机在社会生产生活的各个领域得到了广泛的应用。近年来,电机的振动噪声逐渐成为衡量电机性能的重要指标。以新能源汽车为代表的交通装备领域对电机的振动噪声提出了极高的要求。对新能源汽车而言,驱动电机的振动噪声不仅降低了车辆的乘坐舒适性,还会影响到用户对品牌的认可度和市场竞争力。在家用电器、医疗器械等领域,出于保护人体健康、降低环境噪声污染的要求,也要求将电机的噪声控制在一定的范围内。因此,降低电机振动和噪声有重要意义。

[0003] 电机振动噪声与电机内部电磁力分布、电机结构特性以及运行工况密切相关,为了准确对电机振动噪声进行评估,给低振动电机的设计提供有力工具,急需一种能准确快速计算电机电磁力及电磁振动噪声的方法。现有电机振动计算方法主要有解析法、有限元法和半解析法。在解析法中,电机电磁力、固有频率和振动传递函数、电机振动变形及振动加速度都通过解析公式计算得到。解析法效率较高,但电机结构复杂导致解析法计算精度较低,不能准确评估电机的真实振动情况。因此,有限元法成为振动计算的主流,在利用有限元法计算电机振动时,首先需要建立电磁有限元模型,仿真得到电机的电磁力;然后建立电机的三维结构有限元模型,确定边界条件,导入电磁有限元计算得到的电磁力;最后利用有限元软件进行结构动力学仿真得到振动响应,并通过声学边界元仿真得到电机的噪声分布情况。有限元方法计算精度较高且适用于任何复杂结构的电机,但有限元方法涉及多场耦合计算,建模复杂导致计算效率较低,不适合在电机设计初期对电机振动性能进行快速评估,也不能胜任电机多转速工况振动计算的需求。而半解析法则结合了解析法和有限元的优势,在保证计算精度的同时也能提高振动计算效率。但现有振动半解析计算方法中只是将振动响应计算部分用模态叠加法代替,而最为耗时的电磁力计算和传递函数计算部分仍然依赖有限元计算数据,并未从根本上解决振动计算复杂的问题。

发明内容

[0004] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求,本发明提供一种电机电磁力与电磁振动噪声分析方法及系统,其目的在于在保证电机振动计算精度的同时能减小计算量,实现电机振动噪声的快速预测和评估,为电机振动噪声优化与多转速工况振动计算提供有力工具。

[0005] 为了实现上述目的,按照本发明的一个方面,提供一种电机电磁力及电磁振动噪声分析方法,包括如下步骤:

[0006] S100:确定电机的运行工况,根据其运行工况获得电机任意时刻的相电流,根据电机槽极配合、绕组分布确定电机的槽磁动势函数和槽矩阵,并结合所述相电流获得电机任意时刻的电枢磁动势;

[0007] S200:建立所述电机的静态有限元模型,并分析获得该电机永磁体磁动势以及该电机定子和转子的复数气隙磁导函数;

[0008] S300:根据所述电枢磁动势、永磁体磁动势及定子和转子的复数气隙磁导函数获得该电机的气隙磁密,并基于该气隙磁密获得所述电机每个定子齿上所受的电磁力;

[0009] S400:建立所述电机的三维结构有限元模型,并分析获得电机的振动传递函数;

[0010] S500:根据所述电机定子齿电磁力和振动传递函数,计算获得所述电机在任意电磁力激励下的振动速度和振动加速度,基于所述振动速度和振动加速度获得电机辐射的声压级和声功率。

[0011] 进一步地,步骤S100具体包括:

[0012] S101:确定电机的槽极配合与绕组分布;

[0013] S102:根据所述槽极配合与绕组分布,建立电机槽矩阵;

[0014] S103:建立所述电机的槽磁动势函数;

[0015] S104:根据电机的运行工况,确定电机的相电流瞬时值;

[0016] S105:结合所述相电流瞬时值、电机槽矩阵以及槽磁动势函数获得电机在任意时刻与电流下的电枢磁动势。

[0017] 进一步地,所述槽磁动势函数为:

$$[0018] \quad N_q(\theta_s) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \theta_s \leq \theta_q - \frac{\Delta\theta}{2} \\ \left[\frac{1}{\Delta\theta} (\theta_s - \theta_q) + \frac{1}{2} \right] & \theta_q - \frac{\Delta\theta}{2} \leq \theta_s \leq \theta_q + \frac{\Delta\theta}{2} \\ 1 & \theta_q + \frac{\Delta\theta}{2} \leq \theta_s \leq 2\pi \end{cases}$$

[0019] 其中, $N_q(\theta_s)$ 为槽磁动势函数, $\Delta\theta$ 为槽宽, θ_q 为第q个槽中心位置,其计算公式为: $\theta_q = (q-1) \cdot 2\pi/Q_s$, θ_s 为任意时刻转子位置, Q_s 为电机槽数。

[0020] 进一步地,步骤S200具体包括:

[0021] S201~S203:建立无槽定子和无槽转子有限元仿真模型,并施加幅值大小为1的恒定虚拟磁动势,仿真计算定子及转子均无槽时的气隙磁密;

[0022] S204~S205:建立有槽定子-无槽转子有限元模型,并施加幅值大小为1的恒定虚拟磁动势,仿真计算定子有槽、转子无槽时的气隙磁密;

[0023] S207~S208:建立无槽定子-有槽转子有限元模型,并施加幅值大小为1的恒定虚拟磁动势,仿真计算定子无槽、转子有槽时的气隙磁密;

[0024] S206、S209:根据所述定子及转子均无槽时的气隙磁密、定子有槽、转子无槽时的气隙磁密以及定子无槽、转子有槽时的气隙磁密,得到定子和转子的复数气隙磁导函数。

[0025] 进一步地,所述复数气隙磁导函数为:

$$[0026] \quad \lambda_r^s = \frac{B_{r,slot}^s B_{r,slotless}^s + B_{t,slot}^s B_{t,slotless}^s}{B_{r,slotless}^2 + B_{t,slotless}^2}$$

$$[0027] \quad \lambda_t^s = \frac{B_{r,slot}^s B_{t,slotless}^s - B_{t,slot}^s B_{r,slotless}^s}{B_{r,slotless}^2 + B_{t,slotless}^2}$$

$$[0028] \quad \lambda_r^r = \frac{B_{r,slot}^r B_{r,slotless} + B_{t,slot}^r B_{t,slotless}}{B_{r,slotless}^2 + B_{t,slotless}^2}$$

$$[0029] \quad \lambda_t^r = \frac{B_{r,slot}^r B_{t,slotless} - B_{t,slot}^r B_{r,slotless}}{B_{r,slotless}^2 + B_{t,slotless}^2}$$

[0030] 其中, λ_r^s 和 λ_t^s 分别为定子气隙磁导函数的径向和切向分量; λ_r^r 和 λ_t^r 分别为转子气隙磁导函数的径向和切向分量;

[0031] $B_{r,slotless}$ 和 $B_{t,slotless}$ 分别为定子及转子均无槽时的气隙磁密的径向和切向分量;

[0032] $B_{r,slot}^s$ 和 $B_{t,slot}^s$ 分别为定子有槽、转子无槽时的气隙磁密的径向和切向分量;

[0033] $B_{r,slot}^r$ 和 $B_{t,slot}^r$ 分别为定子无槽、转子有槽时的气隙磁密的径向和切向分量。

[0034] 进一步地,步骤S400具体包括:

[0035] S401:确定电机定子铁芯及绕组的等效材料参数;

[0036] S402:建立所述电机的三维结构有限元模型;

[0037] S403:在电机定子齿上施加幅值为1,沿定子圆周呈周期分布的径向力和切向力;

[0038] S404:通过有限元仿真计算得到电机不同齿在单位激振力作用下的振动传递函数。

[0039] 进一步地,步骤S500具体包括:

[0040] S502:将定子齿电磁力进行傅里叶分解,得到定子齿电磁力的频谱分布;

[0041] S503:将计算得到的各个定子齿上的电磁力谐波和对应齿的振动传递函数求积,将所有齿的计算结果叠加即可得到电机的总振动变形;

[0042] S505:基于位移、速度和加速度之间的关系获得电机表面的振动速度和振动加速度。

[0043] 按照本发明的第二个方面,提供一种电机电磁力与电磁振动噪声分析系统,包括:

[0044] 电枢磁动势分析模块:用于确定电机的运行工况,根据其运行工况获得电机任意时刻的相电流,根据电机槽极配合、绕组分布确定电机的槽磁动势函数和槽矩阵,并结合所述相电流获得电机任意时刻的电枢磁动势;

[0045] 复数气隙磁导函数计算模块:用于建立所述电机的静态有限元模型,并分析获得该电机永磁体磁动势以及该电机定子和转子的复数气隙磁导函数;

[0046] 电磁力计算模块:用于根据所述电枢磁动势、永磁体磁动势及定子和转子的复数气隙磁导函数获得该电机的气隙磁密,并基于该气隙磁密获得所述电机每个定子齿上所受的电磁力;

[0047] 振动传递函数分析模块:用于建立所述电机的三维结构有限元模型,并分析获得电机的振动传递函数;

[0048] 电机振动计算模块:用于根据所述电机定子齿电磁力和振动传递函数,计算获得所述电机在任意电磁力激励下的振动速度和振动加速度;

[0049] 电机辐射的声压级和声功率计算模块:用于根据所述振动速度和振动加速度获得电机辐射的声压级和声功率。

[0050] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比,能够取得下列有益效果:

[0051] 1. 本发明提出了一种电机电磁力及电磁振动噪声的分析方法, 基于此方法建立了电机电磁振动噪声快速计算系统, 可以对电机各种工况下的电磁力及电磁振动噪声进行快速评估与分析, 其计算精度可以达到传统有限元计算方法相当的水平, 但计算时间大幅缩短, 为电机振动优化和多转速工况振动快速评估提供了有力工具。

[0052] 2. 本发明提供一种基于静态有限元的电机气隙磁导计算方法, 通过构建虚拟磁势有限元仿真模型, 可以快速计算任意结构电机的气隙磁导, 解决了电磁气隙磁导计算复杂的难题。

[0053] 3. 本发明创新性的提出了槽磁动势和槽矩阵, 用于计算电机在任意电流激励下的电枢磁动势。通过该方法, 将考虑高频电流谐波的电枢磁动势的计算时间大幅缩短, 同时提高了计算的精度。

[0054] 4. 本发明提出的电磁力及电磁振动计算方法同时考虑了转子磁导、磁场饱和、切向电磁力以及PWM电流谐波, 在大幅加快计算速度的同时进一步提高计算精度。

附图说明

[0055] 图1为本发明实施例电机电磁力及电磁振动噪声计算流程示意图;

[0056] 图2为本发明实施例中电机电枢磁动势计算流程示意图;

[0057] 图3为本发明实施例六相36槽6极整数槽双层短距绕组分布示意图;

[0058] 图4为本发明实施例复数气隙磁导计算流程示意图;

[0059] 图5为本发明实施例振动传递函数计算流程示意图;

[0060] 图6为本发明实施例中电机振动计算流程示意图。

具体实施方式

[0061] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白, 以下结合附图及实施例, 对本发明进行进一步详细说明。应当理解, 此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明, 并不用于限定本发明。此外, 下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0062] 如图1所示, 本发明实施例提供一种电机电磁力及电磁振动噪声计算方法, 其包括如下步骤:

[0063] (1) 整个计算流程开始前需要进行计算平台的初始化, 包括设定电机的转速、转矩、功率等, 以确定电机的运行工况。根据电机运行工况可以计算电机任意时刻下的相电流

$I_{ph,t}$ 。

[0064] (2) 根据电机槽极配合、绕组分布确定电机的槽磁动势函数和槽矩阵, 并结合步骤(1)中计算得到的相电流计算电机任意时刻下的电枢磁动势, 具体流程如图2所示:

[0065] 首先根据电机的槽极配合和绕组分布建立电机槽矩阵 M_{slot} , 用于描述任意电机槽内导体分布情况, 该矩阵的维度为 $m \times Q_s$, 其中 m 为电机的相数, Q_s 为电机槽数。其建立的具体规则为: 当电机某个槽内的导体均属于同一相时, 槽矩阵中相应的行和列的元素记为1; 当电机某个槽内的导体不属于同一相时, 槽矩阵中相应的行和列的元素分别记为0.5。以六相36槽6极整数槽双层短距绕组为例, 其一个极距内的绕组分布如图3所示:

[0066] 其槽矩阵可表示为:

$$[0067] \quad M_{\text{slot}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & -0.5 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & -0.5 & -0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0068] 接下来,建立电机的槽磁动势函数,其定义为当槽内导体匝数为一匝,通入大小为1A的电流时,导体产生的磁动势沿定子圆周的分布,可以用公式表示为:

$$[0069] \quad N_q(\theta_s) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \theta_s \leq \theta_q - \frac{\Delta\theta}{2} \\ \left[\frac{1}{\Delta\theta} (\theta_s - \theta_q) + \frac{1}{2} \right] & \theta_q - \frac{\Delta\theta}{2} \leq \theta_s \leq \theta_q + \frac{\Delta\theta}{2} \\ 1 & \theta_q + \frac{\Delta\theta}{2} \leq \theta_s \leq 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

[0070] 其中, $N_q(\theta_s)$ 为槽磁动势函数, $\Delta\theta$ 为槽宽, θ_q 分别为第 q 个槽中心位置,其计算公式为: $\theta_q = (q-1) \cdot 2\pi/Q_s$, θ_s 为任意时刻转子位置, Q_s 为电机槽数。

[0071] 结合相电流、槽矩阵和槽磁动势函数,根据公式(3)则可以计算出电机在任意时刻与电流下的电枢磁动势。

$$[0072] \quad f_{\text{arm}} = I_{\text{ph,t}} \cdot M_{\text{slot}} \cdot N_q(\theta_s) \quad (3)$$

[0073] (3)建立静态有限元模型,仿真计算得到永磁体磁动势,其径向和切向分量分别记为 f_{pm}^r 和 f_{pm}^t 。

[0074] (4)通过静态有限元仿真计算电机的复数气隙磁导函数,具体计算流程如图4所示:

[0075] 第一步,建立无槽定子、无槽转子有限元仿真模型,并施加幅值大小为1的恒定虚拟磁动势,仿真计算定、转子均无槽时的气隙磁密,其径向和切向分量分别为 $B_{r,\text{slotless}}$ 和 $B_{t,\text{slotless}}$;第二步,建立有槽定子-无槽转子有限元模型,并施加幅值大小为1的恒定虚拟磁动势,仿真计算定子有槽、转子无槽时的气隙磁密,其径向和切向分量分别为 $B_{r,\text{slot}}^s$ 和 $B_{t,\text{slot}}^s$;第三步,建立无槽定子-有槽转子有限元模型,并施加幅值大小为1的恒定虚拟磁动势,仿真计算定子无槽、转子有槽时的气隙磁密,其径向和切向分量分别为 $B_{r,\text{slot}}^r$ 和 $B_{t,\text{slot}}^r$ 。将以上计算得到的三组数据代入公式(4)和(5),可以计算得到定子和转子的复数气隙磁导。

$$[0076] \quad \lambda_r^s = \frac{B_{r,\text{slot}}^s B_{r,\text{slotless}} + B_{t,\text{slot}}^s B_{t,\text{slotless}}}{B_{r,\text{slotless}}^2 + B_{t,\text{slotless}}^2} \quad (4)$$

$$\lambda_t^s = \frac{B_{r,\text{slot}}^s B_{t,\text{slotless}} - B_{t,\text{slot}}^s B_{r,\text{slotless}}}{B_{r,\text{slotless}}^2 + B_{t,\text{slotless}}^2}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_r^r &= \frac{B_{r,\text{slot}}^r B_{r,\text{slotless}} + B_{t,\text{slot}}^r B_{t,\text{slotless}}}{B_{r,\text{slotless}}^2 + B_{t,\text{slotless}}^2} \\
 \lambda_t^r &= \frac{B_{r,\text{slot}}^r B_{t,\text{slotless}} - B_{t,\text{slot}}^r B_{r,\text{slotless}}}{B_{r,\text{slotless}}^2 + B_{t,\text{slotless}}^2}
 \end{aligned} \tag{5}$$

[0078] 其中, λ_r^s 和 λ_t^s 分别为定子气隙磁导的径向和切向分量; λ_r^r 和 λ_t^r 分别为转子气隙磁导的径向和切向分量。

[0079] (5) 将电枢磁动势、永磁体磁动势、定转子气隙磁导代入公式(6)中,可以计算出电机的气隙磁密。

$$\begin{aligned}
 B_{\text{pm}} &= (f_{\text{pm}}^r + j f_{\text{pm}}^t) \cdot (\lambda_r^s - j \lambda_t^s) \cdot (\lambda_r^r - j \lambda_t^r) \\
 B_{\text{arm}} &= (f_{\text{arm}}^r + j f_{\text{arm}}^t) \cdot (\lambda_r^s - j \lambda_t^s) \cdot (\lambda_r^r - j \lambda_t^r) \\
 B_g &= B_{\text{pm}} + B_{\text{arm}} = B_g^r + j B_g^t
 \end{aligned} \tag{6}$$

[0081] 其中, B_{pm} 和 B_{arm} 分别为永磁体和电枢产生的磁密, B_g 为气隙合成磁密, B_g^r 和 B_g^t 分别为气隙磁密的径向和切向分量, j 为虚数单位。

[0082] (5) 在气隙磁密的基础上,基于公式(7)所示麦克斯韦应力张量法,可以计算得到电机的气隙电磁力密度;由于电机振动和噪声是由于定子齿上所受电磁力引起,因此可以将气隙电磁力密度在一个齿距内进行积分来计算每个定子齿上所受的电磁力,具体计算方法如公式(8)所示:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \frac{B_r^2 - B_t^2}{2\mu_0} \\
 \sigma_t &= \frac{B_r B_t}{\mu_0} \\
 F_r &= L_{\text{stk}} R_{\text{si}} \int_{\theta_z - \Delta\theta/2}^{\theta_z + \Delta\theta/2} [\sigma_r \cos(\theta_z - \theta_s) + \sigma_t \sin(\theta_z - \theta_s)] d\theta_s \\
 F_t &= L_{\text{stk}} R_{\text{si}} \int_{\theta_z - \Delta\theta/2}^{\theta_z + \Delta\theta/2} [\sigma_t \cos(\theta_z - \theta_s) - \sigma_r \sin(\theta_z - \theta_s)] d\theta_s
 \end{aligned} \tag{7}$$

[0085] 其中, σ_r , σ_t 分别表示径向、切向的气隙电磁力密度, B_r , B_t 分别表示气隙磁密的径向、切向分量, μ_0 为真空磁导率, θ_z 表示第 z 个齿中心位置, F_r 和 F_t 分别为定子齿上径向和切向电磁力, L_{stk} 为定子铁芯长度, R_{si} 为定子内径。

[0086] (6) 为了准确描述电机的机械结构特性,本发明通过建立三维结构有限元模型计算出电机的振动传递函数,具体计算流程如图5所示:

[0087] 由于电机定子的叠压结构和导体在槽内分布的不均匀性,导致电机铁芯和绕组的材料参数呈现明显的正交异性。因此,本发明首先基于材料力学理论计算定子铁芯及绕组的等效材料参数;然后建立电机三维结构有限元模型,在电机定子齿上施加幅值为1,沿定子圆周呈周期分布的径向力和切向力,即 $F_{\text{unit},z}(f) = 1$,其中, $F_{\text{unit},z}(f)$ 表示施加的单位激振力, f 为力的频率。然后通过有限元仿真计算得到电机不同齿在单位激振力作用下的振动传递函数 $H_z(f) = \bar{H} \cdot e^{j\phi_{H,z}}$ 。其中, \bar{H} 为传递函数的幅值, $\phi_{H,z}$ 为传递函数相位。

[0088] (7) 根据上述步骤获得的电机定子齿电磁力和振动传递函数,即可计算出电机在任意电磁力激励下的振动速度和振动加速度。具体计算流程如图6所示。首先,将定子齿电磁力进行傅里叶分解,得到定子齿电磁力的频谱分布,如公式(9)所示。其中, \bar{F} 为电磁力谐波的幅值, $\varphi_{F,z}$ 为电磁力谐波的相位。

$$[0089] \quad F_{r,t}(z,f) = \bar{F} \cdot e^{j(2\pi ft + \varphi_{r,z})} \quad (9)$$

[0090] 将计算得到的各个定子齿上的电磁力谐波和对应齿的振动传递函数相乘,并将所有齿的计算结果叠加即可得到电机的总振动变形,最后基于位移、速度和加速度之间的关系计算出电机表面的振动速度和振动加速度,如公式(10)-(11)所示。

$$[0091] \quad \begin{aligned} y &= H_z(f) \cdot [F_r(z,f) + F_t(z,f)] \\ &= \bar{H} \cdot \bar{F}_r e^{j(2\pi ft + \varphi_{r,z} + \varphi_{H,z})} + \bar{H} \cdot \bar{F}_t e^{j(2\pi ft + \varphi_{t,z} + \varphi_{H,z})} \end{aligned} \quad (10)$$

$$[0092] \quad \begin{aligned} v &= \dot{y} \\ a &= \dot{v} = \ddot{y} \end{aligned} \quad (11)$$

[0093] 其中,y,v,a分别为振动位移、振动速度和振动加速度, \dot{y} 和 \ddot{y} 为振动位移的一阶和二阶导数, \dot{v} 为振动速度的一阶导数, $H_z(f) = \bar{H} \cdot e^{j\varphi_{H,z}}$ 电机不同齿在单位激振力作用下的振动传递函数, \bar{H} 为传递函数的幅值, $\varphi_{H,z}$ 为传递函数相位; $F_r(z,f)$ 和 $F_t(z,f)$ 分别为定子齿上径向和切向电磁力, \bar{F}_r 、 \bar{F}_t 分别表示径向、切向电磁力的幅值, $\varphi_{r,z}$ 、 $\varphi_{t,z}$ 分别表示径向、切向电磁力相位,f为频率,t为时间。

[0094] (8) 最后基于电机表面振动速度计算电机辐射的声压级和声功率,首先基于公式(12)计算不同频率的激振力下的电机表面声辐射效率。

$$[0095] \quad \sigma_m(\omega) = \frac{(kd)^2 [Y_m(k_0 d) J_{m+1}(k_0 d) - J_m(k_0 d) Y_{m+1}(k_0 d)]}{[m J_m(k_0 d) - (k_0 d) J_{m+1}(k_0 d)]^2 + [m Y_m(k_0 d) - (k_0 d) Y_{m+1}(k_0 d)]^2} \quad (12)$$

[0096] 其中, ω 为声辐射的频率, c_0 为空气中声音的传播速度, $k_0 = \omega / c_0$ 为空气中声音的波长,d为定子机壳外径,m为轴向模态阶次, σ_m 为m阶模态的声辐射效率, J_m, J_{m+1} 分别为m阶和m+1阶第一类Bessel函数, Y_m, Y_{m+1} 分别为m阶和m+1阶第二类Bessel函数。

[0097] 然后将振动速度和声辐射效率代入公式(13)中,可以计算得到电机的声辐射功率,其中, $W_m(\omega)$ 表示m阶模态辐射声功率, $v_{m\omega}$ 为空间阶次为m、频率为 ω 的振动速度幅值, ρ_0 为空气密度, S_c 为辐射面积。

$$[0098] \quad W_m(\omega) = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 S_c \sigma_m(\omega) (v_{m\omega})^2 \quad (13)$$

[0099] 则声功率级为:

$$[0100] \quad L_w(\omega) = 10 \log_{10} \left(\sum_m W_m(\omega) / W_0 \right) \quad (14)$$

[0101] 其中, W_0 为基准声功率, $W_0 = 10^{-2} \text{W}$ 。

[0102] 基于上述实施例的内容,作为一种可选的实施例,本发明实施例中提供的电机电磁力及电磁振动噪声分析系统包括电枢磁动势分析模块:用于确定电机的运行工况,根据其运行工况获得电机任意时刻的相电流,根据电机槽极配合、绕组分布确定电机的槽磁动

势函数和槽矩阵,并结合所述相电流获得电机任意时刻的电枢磁动势。

[0103] 基于上述实施例的内容,作为一种可选的实施例,本发明实施例中提供的电机电磁力及电磁振动噪声分析系统包括复数气隙磁导函数计算模块:用于建立所述电机的静态有限元模型,并分析获得该电机永磁体磁动势以及该电机定子和转子的复数气隙磁导函数。

[0104] 基于上述实施例的内容,作为一种可选的实施例,本发明实施例中提供的电机电磁力及电磁振动噪声分析系统包括电磁力计算模块:用于根据所述电枢磁动势、永磁体磁动势及定子和转子的复数气隙磁导函数获得该电机的气隙磁密,并基于该气隙磁密获得所述电机每个定子齿上所受的电磁力。基于上述实施例的内容,作为一种可选的实施例,本发明实施例中提供的电机电磁力及电磁振动噪声分析系统包括振动传递函数分析模块:用于建立所述电机的三维结构有限元模型,并分析获得电机的振动传递函数。

[0105] 基于上述实施例的内容,作为一种可选的实施例,本发明实施例中提供的电机电磁力及电磁振动噪声分析系统包括电机振动计算模块:用于根据所述电机定子齿电磁力和振动传递函数,计算获得所述电机在任意电磁力激励下的振动速度和振动加速度。

[0106] 基于上述装置实施例的内容,作为一种可选的实施例,本发明实施例中提供的电机电磁振动噪声分析系统包括电机辐射的声压级和声功率计算模块:用于根据所述振动速度和振动加速度获得电机辐射的声压级和声功率。

[0107] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员可以清楚地了解到上述技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来。

[0108] 附图中的流程图和框图显示了根据本发明的多个实施例的系统、方法和计算机软件产品的可能实现的体系架构、功能和操作。基于这种认识,流程图或框图中的每个方框可以代表一个模块、程序段或代码的一部分,所述模块、程序段或代码的一部分包含一个或多个用于实现规定的逻辑功能的可执行指令。也应当注意,在有些作为替换的实现方式中,方框中所标注的功能也可以以不同于附图中所标注的顺序发生。例如,两个连续的方框实际上可以基本并行地执行,有时也可以按相反的顺序执行,这依所涉及的功能而定。

[0109] 在本专利中,术语“包括”、“包含”或者其任何其它变体意在涵盖非排它性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其它要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0110] 最后应说明的是:以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

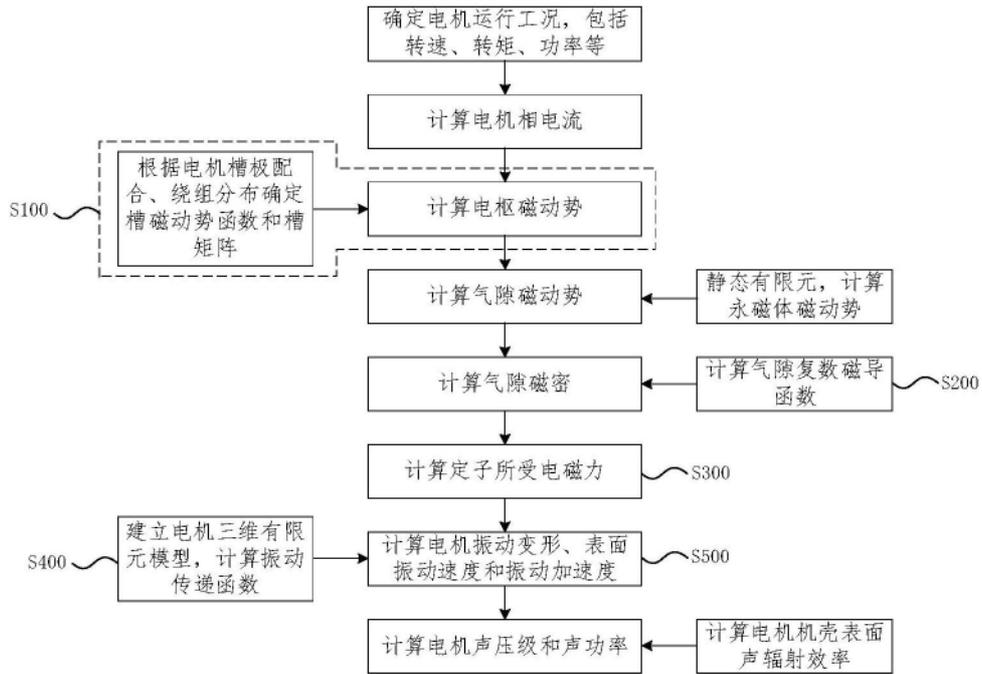


图1

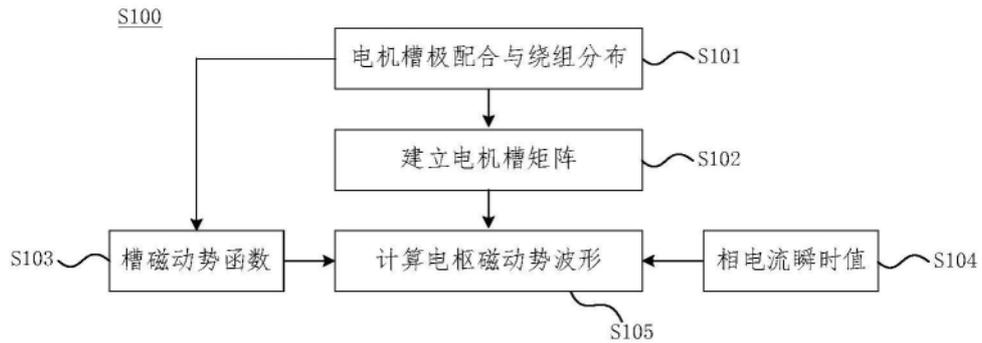


图2

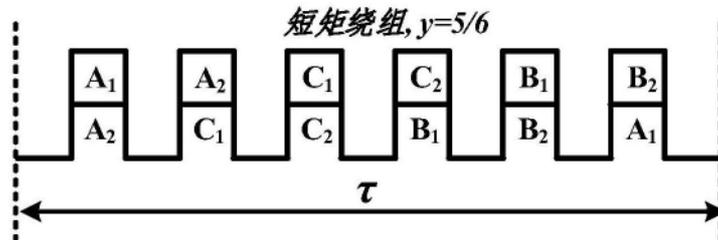


图3

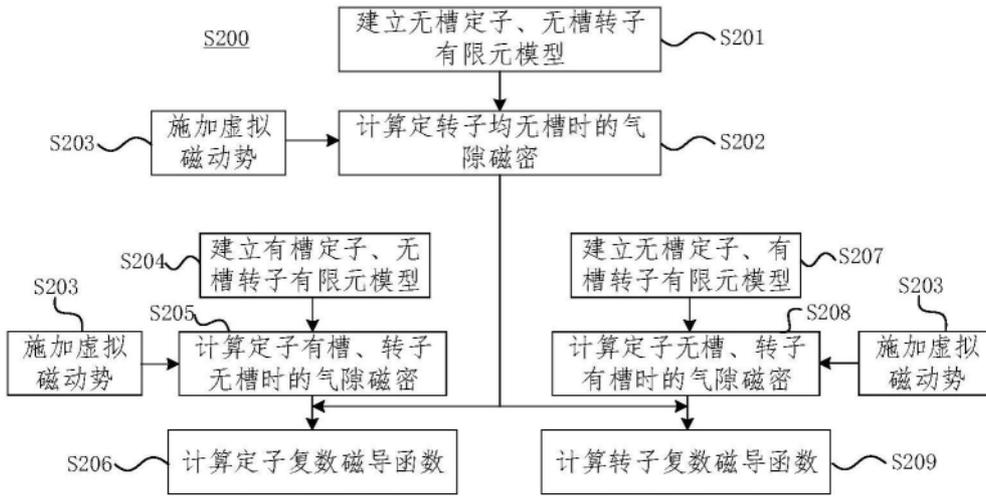


图4

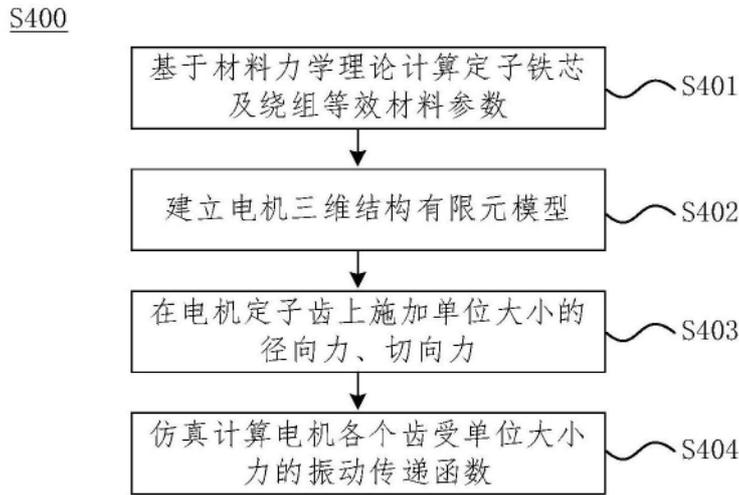


图5

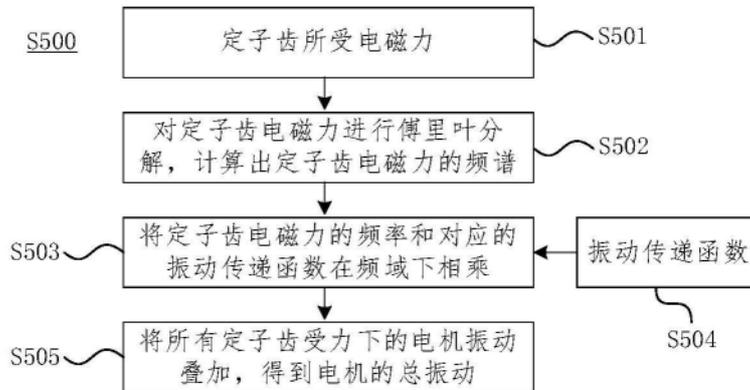


图6