

考虑动圈偏心的电动振动台等效电磁力计算方法

左曙光, 潘健, 吴旭东, 冯朝阳

(同济大学汽车学院, 201804, 上海)

摘要: 为了反映动圈激励电磁力对偏载工况下电动振动台横向振动的影响,提出了一种考虑动圈偏心影响的电动振动台等效电磁力计算方法。综合选取动圈通电电流、垂向位置、翻转偏心角度、径向平移偏心距及方向等5个因素,通过求取径向平移偏心距极限及假设虚拟偏心距进行变量代换,解决了现有正交试验设计方法难以应用于多个因素之间存在取值相互约束情况的问题。通过电磁有限元仿真获得了与动圈分布电磁力等效的集中电磁力样本,采用神经网络方法进行样本拟合获得了动圈全运动工况等效电磁力。仿真结果表明:径向等效电磁力主要随翻转偏心角度的增加而增加,且在大电流工况增加更迅速;采用所提方法获得的等效电磁力相对误差均在10%以内,可在满足工程误差要求的同时快速实时获得动圈全运动工况等效电磁力,解决了由有限元及精确解析方法计算等效电磁力速度慢所导致的无法进行电动振动台电磁-结构双向耦合仿真的问题。该方法也可应用于其他相似的运动系统受力计算问题。

关键词: 电动振动台;等效电磁力;偏心;计算方法;正交试验设计

中图分类号: TM153;TH87 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202008017 **文章编号:** 0253-987X(2020)08-0132-08



OSID 码

A Calculation Method of Equivalent Electromagnetic Force for Electrodynamic Shakers Considering Moving Coil's Eccentricity

ZUO Shuguang, PAN Jian, WU Xudong, FENG Zhaoyang

(School of Automotive, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A calculation method of equivalent electromagnetic force considering moving coil's eccentricity is proposed to reflect the influences of the moving coil's electromagnetic forces on the lateral vibration of the electrodynamic shaker under offset loading conditions. Five factors including the moving coil's current, vertical position, flipping eccentricity angle, radial translating eccentricity distance and direction are considered. The problem that it is difficult to apply the existing orthogonal test design method to the situation with a mutual constraint among multiple factors' values is solved by calculating the radial eccentricity distance limit and assuming a virtual eccentricity distance. The concentrated electromagnetic force samples equivalent to the distributed electromagnetic forces of the moving coil are obtained through an electromagnetic finite element simulation. A neural network method is used to fit the samples and the equivalent electromagnetic forces in full moving conditions are obtained. Simulation results show that the radial equivalent electromagnetic force mainly increases with the increase of flipping eccentricity angle, especially increases rapidly at the high current condition. The relative errors of the

收稿日期: 2019-11-03。 作者简介: 左曙光(1968—),男,教授,博士生导师;吴旭东(通信作者),男,副教授,博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助项目(2017YFB0103103)。

网络出版时间: 2020-03-31

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200330.1806.004.html>

equivalent electromagnetic forces obtained by the proposed method are within 10%. The equivalent electromagnetic forces in full moving conditions can be effectively obtained in real time while meeting the engineering requirement of calculation error. The problem that the electrodynamic shaker's electromagnetic-structure bidirectional coupling simulation can not be carried out due to the slow speed of the finite element method and the exact analytical method to calculate the equivalent electromagnetic force is well solved. The proposed method can also be applied to the calculation of forces on other similar moving systems.

Keywords: electrodynamic shaker; equivalent electromagnetic force; eccentricity; calculation method; orthogonal test design

电动振动台可以准确复现机械零部件所受振动载荷,在机械、航空等产品疲劳与可靠性检测方面得到了广泛的应用^[1-2]。本文研究的电动振动台垂向为主振方向,但是前期试验发现,当电动振动台附加的被测件存在偏载时,在 115 Hz 简谐电流激励下,台面中心点垂向输出加速度幅值为 9.8 m/s^2 时,其横向振动比量级已经达到 100%,不能满足使用要求。通过机理分析可知,当动圈存在偏心时,振动台会受到不平衡径向电磁力,当运动系统质心发生径向偏移时垂向电磁力分量也会导致翻转力矩的产生,由于电动振动台动圈存在横向平移模态及翻转模态^[3-4],在这些模态频率处时,较小的不平衡径向电磁力及翻转力矩也可能激发剧烈的横向振动。由于台面螺栓孔位置和数量的限制,常难以保证被测件完全居中,为了反映动圈激励电磁力对横向振动的影响,以深入研究与解决横向振动问题,需要建立能够反映横向振动的电动振动台机电耦合模型,而准确实时获取动圈激励电磁力是耦合建模的前提。

在 2013 年,孟繁莹便提出了某型电动振动台的横向振动问题,发现在频率为 420、950、1 500 及 1 980 Hz 时横向振动比较大,但并未建立有效的机电耦合模型进行深入分析^[5]。目前在电动振动台机电耦合建模方面,大多数学者建立了仅能考虑垂向运动的集中参数模型,并进行了模型仿真与电磁力分析^[6-8],刘源及左曙光等则考虑到了振动台实际几何尺寸,建立了多体动力学模型,进行了电动振动台垂向运动耦合仿真^[9-10]。然而,上述电动振动台机电耦合模型均只考虑了垂向振动,如何反映其横向振动特性仍是该领域内的一大难点;此外,在电动振动台电磁力分析时,现有研究也没有考虑动圈偏心的影响,难以全面精准地反映其振动特性。因此,为了真实模拟振动台运行工况,有必要考虑动圈通电电流、垂向位置及偏心情况对其激励电磁力的综合影响,准确获取动圈激励电磁力,为进一步实现精准

机电耦合建模及横向振动特性分析奠定基础。

动圈激励电磁力计算原则上可通过有限元法及解析方法进行。通过电磁有限元仿真可以获得与动圈实际分布电磁力等效的集中电磁力数值(简称等效电磁力),等效电磁力便于在机电耦合建模时进行加载,但是采用有限元仿真计算耗时较长,无法实现实时等效电磁力的获取以及和振动台机械结构的双向耦合仿真;而在磁场及电磁力解析建模方面,目前已经有等效磁路法^[11-12]、磁动势乘磁导法^[13-14]以及精确子域法^[15-16]等方法应用于电机等电磁设备,但对电动振动台动圈偏心条件下电磁力解析求解仍没有成熟准确的方案,且解析计算也需要一定的计算时间,不利于实时电磁力获取,如何快速获取动圈不同运动工况下的等效电磁力需要深入研究。在其他学科领域,针对参数的快速计算与预测问题,学者多基于正交试验,应用多元非线性拟合、神经网络及支持向量机等方法来解决,包括电机电磁力波预测^[17]、电机转矩波动预测^[18]、发动机排放预测^[19]以及焊接工艺参数预测^[20-21]等均获得了较好的效果。

为了解决上述问题,本文借鉴上述研究成果提出了一种考虑动圈偏心的电动振动台等效电磁力计算方法。首先,建立了电动振动台电磁有限元模型;其次,考虑动圈通电电流、垂向位置及偏心情况等多个因素,进行了多个因素水平取值存在相互约束的正交试验设计和有限元仿真,获得了不同水平组合下的等效电磁力样本;然后,选取主要因素,通过神经网络方法进行了等效电磁力样本拟合与验证,训练得到的神经网络可以快速实时计算动圈全运动工况下等效电磁力数值;最后,进行了等效电磁力的规律分析。

1 电动振动台电磁有限元建模

1.1 电动振动台工作原理

本文针对一种双磁路电动振动台进行研究,该

振动台垂向为主振方向,其电磁系统由励磁线圈、驱动线圈(即动圈)、双磁路磁钢结构和磁槽盖等构成,如图1所示。由动圈、筋板以及台面等构成的运动系统处于一个励磁线圈激发的高磁感应强度的工作气隙中,当动圈通有交变电流时,会受到垂向电磁力的作用在工作气隙中往复运动,并产生需要的垂向振动波形。

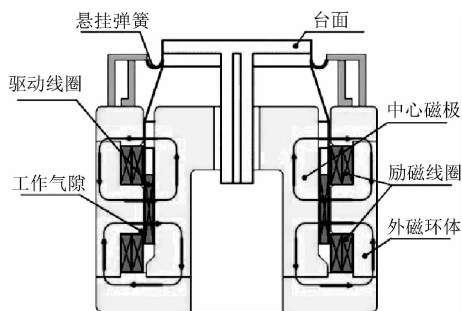


图1 电动振动台电磁结构示意图

1.2 电动振动台电磁有限元建模

为了最终获取电动振动台动圈全运动工况的等效电磁力,首先应建立电动振动台电磁有限元模型,如图2所示。

针对该型电动振动台结构,利用JMAG软件进行电磁有限元建模。其中,振动台磁钢结构及磁槽盖等材料均设置为10号钢,中心磁极沿周向开有8道槽以便于动圈装配;动圈和励磁线圈导线材料设置为铜,动圈匝数为21.5匝,上、下励磁线圈匝数均为350匝,且通有180 A反向直流电,使工作气隙达到磁饱和状态。

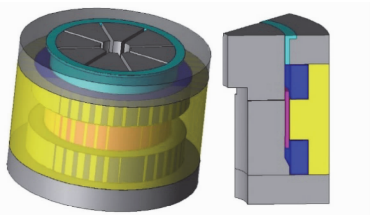


图2 电磁有限元模型

2 正交试验设计及仿真

在建立了电动振动台电磁有限元模型后,即可通过有限元仿真进行不同工况下动圈等效电磁力的计算。为了进行动圈全运动工况等效电磁力计算,本文选取了对其有影响的5个因素,由于考虑多个影响因素,且动圈通电电流等因素取值范围较大,因此本文采用正交试验的方法,既可以考虑各因素之间的耦合效应,同时可以缩减仿真组数和时间^[22]。

但是,由于本文考虑的多个因素之间存在取值相互约束,故区别于现有的正交试验设计过程。

2.1 动圈等效电磁力影响因素

动圈在运动过程中,其等效电磁力受到多个因素影响。首先,依据安培定则,动圈在磁场中受力与其通电电流成正比,故动圈电流需要考虑;其次,在动圈运动过程中,由于上、下磁路结构的不对称性以及动圈磁场和励磁磁场的耦合作用,工作气隙磁场沿垂向分布并不均匀,因此动圈垂向位置对其等效电磁力的影响也需考虑。此外,由于被测件在台面上偏载及安装误差等因素会使动圈发生翻转及径向平移偏心,由此会使动圈受到不平衡径向等效电磁力,影响振动台垂向输出波形及横向振动比,故动圈翻转角度、径向平移偏心距以及二者之间的方向也需要考虑。

综上,本文考虑的动圈等效电磁力影响因素包括动圈通电电流 I 、垂向位置 z 、翻转偏心角度 α 、径向平移偏心方向相对于翻转偏心轴的夹角 θ 及径向平移偏心距 d 等。对于该型电动振动台,进行试验设计时上述5个因素的取值范围如下: $-200\text{ A} \leq I \leq 200\text{ A}$, $-38\text{ mm} \leq z \leq 38\text{ mm}$, $0^\circ \leq \alpha \leq 0.65^\circ$, $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, $0\text{ mm} \leq d \leq 2\text{ mm}$,以上范围即可包含实际使用中动圈所有运动条件下的受力工况。

但是,由于动圈所处气隙空间限制, α 、 θ 及 d 等3个影响因素之间存在取值相互约束,即在 α 和 θ 取不同值时, d 不一定可取 $[0, 2]\text{ mm}$ 范围内的所有值,此时一般的正交试验设计过程将不再适用。对于此类问题目前还没有较为通用的解决方案。参考天津大学梁昭磊对2个因素存在取值约束的试验设计方法的探索^[23],本文通过动圈径向偏心距极限求解及假设虚拟偏心距进行变量代换的方式,合理进行了 α 、 θ 及 d 等3个因素取值相互约束的正交试验设计。

2.2 动圈径向偏心距极限求解

由于本文考虑的影响因素之间存在取值相互约束,为了解决该问题,必须首先对约束条件进行量化求解,即进行动圈径向偏心距极限的求解。

当动圈不存在偏心时,系统结构简图如图3所示。本文以图4所示动圈存在绕 x 轴顺时针 α 角度的翻转偏心为例,图中实线所示结构为翻转后的动圈,则动圈径向平移偏心距 d 的可取值范围与 α 和 θ 的取值有关,假设约束关系为

$$d \leq f(\alpha, \theta) \quad (1)$$

式中: f 为径向平移偏心距极限。

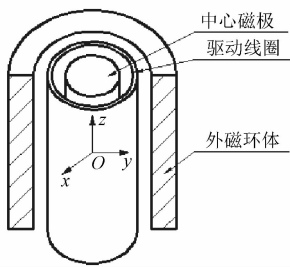


图 3 无偏心结构简图

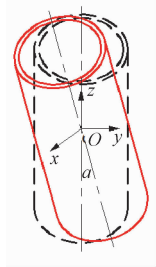


图 4 动圈翻转偏心示意图

对于该振动台结构, d 取值受到径向平移方向上动圈外表面与振动台外磁环体内表面最短距离及动圈内表面与振动台中心磁极外表面最短距离的限制, 以动圈外表面与外磁环体内表面最短距离求解为例, 动圈未偏心时下表面外圆周方程如式(2)所示, 外磁环体内表面圆周方程如式(3)所示

$$x^2 + y^2 = r_1^2 \quad (2)$$

$$x^2 + y^2 = r_2^2 \quad (3)$$

式中: x 和 y 分别为相同坐标系下沿 x 轴及 y 轴的坐标; r_1 为动圈外表面半径; r_2 为外磁环体内表面半径。

当动圈绕 x 轴翻转角度 α 后, 下表面外圆周坐标满足以下变换关系

$$\left. \begin{aligned} x' &= x \\ y' &= y \cos \alpha - z \sin \alpha \\ z' &= y \sin \alpha + z \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: z 为与 x 、 y 在相同坐标系下沿 z 轴的坐标; x' 、 y' 及 z' 为动圈绕 x 轴翻转角度 α 后, 下表面外圆周与其原始坐标 x 、 y 及 z 对应的新坐标值。

联立式(2)和式(4), 得到动圈翻转后下表面外圆周方程

$$y' = \sqrt{r_1^2 - x'^2} \cos \alpha - z \sin \alpha \quad (5)$$

外圆周在 xOy 平面内第一象限的投影如图 5 所示。

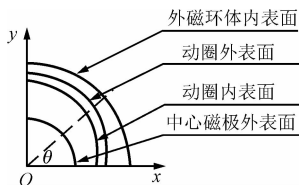
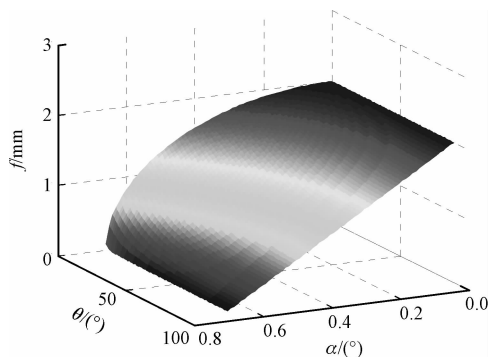


图 5 外圆周投影示意图

利用 Matlab 软件求解式(3)及式(5)在 xOy 平面内第一象限的投影沿 θ 角方向的距离最小值, 即为动圈外表面与振动台外磁环体内表面最短距离。同理可求得动圈内表面与振动台中心磁极外表面最短距离, 两个最短距离中的较小值即为式(1)中径向

平移偏心距极限 f , 最终得到 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 时 f 随 α 和 θ 变化的三维响应面, 如图 6 所示, $-90^\circ \leq \theta < 0^\circ$ 时的 f 值可依据 θ 角对称关系在图 6 中获得。

图 6 f 随 α 、 θ 变化的三维响应面

由图 6 可知, f 受到 α 和 θ 的耦合影响, 故现有正交试验设计方法在这类问题中无法有效应用。

2.3 正交试验设计及仿真

在求取动圈径向偏心距极限后, 进一步通过变量代换的方式解决因素水平取值存在约束带来的问题。本文首先将 f 及 d 数值按比例转换为 $[-1, 1]$ 区间的编码值, 由于 f 及 d 取值范围均在 $[0, 2]$ 内, 故将原始数值减 1 即可转化为编码值 f_0 及 d_0 。同时, 假设一虚拟径向偏心距 d' , 设其编码值为 d'_0 , 其表达式如下

$$d'_0 = \frac{2d_0 - f_0 + 1}{f_0 + 1}, \quad f_0 \neq -1 \quad (6)$$

依照式(6)进行变量代换后, d'_0 在不同的正交试验组中均可取 $[-1, 1]$ 范围内所有值, 不受径向偏心距极限的限制, 由于变量代换后仍能够包含动圈全部运动工况, 故可以反映等效电磁力的规律以及各因素的综合影响。将 d'_0 数值加 1 即得到 d' , 本文在正交试验设计中均使用 d' 进行, 此时正交试验设计与传统无约束条件的正交试验设计方法相同, 因素水平取值不受约束, 可方便进行试验设计和各因素影响的显著性分析。在依据正交表进行电磁有限元仿真时, 为保证有限元仿真中无运动干涉, 动圈径向偏心距均设置为与 d' 对应的 d 值, 真实径向偏心距编码值 d_0 可通过式(7)反代换求解

$$d_0 = \frac{d'_0(f_0 + 1) + f_0 - 1}{2} \quad (7)$$

式中: $d_0 = d - 1$ 。可见, 上述过程既可以保证正交试验的合理性, 同时也保证了全部试验设计工况可以在电磁有限元仿真中实现。解决了因素取值受约束的问题后, 便可以开展正交试验设计及仿真工作, 为了准确反映动圈等效电磁力规律并提供足够的样

本数,正交试验中 5 个因素的水平数均取为 9,利用 SPSS 软件进行正交试验设计,一共需要做 81 次独立试验,各参数水平取值如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平表

水平	I/A	z/mm	$\alpha/(^{\circ})$	$\theta/(^{\circ})$	d'/mm
1	-200	-38	0.00	-90	0.00
2	-150	-28	0.08	-70	0.25
3	-100	-18	0.16	-45	0.50
4	-50	-8	0.24	-20	0.75
5	10	0	0.32	0	1.00
6	50	8	0.40	20	1.25
7	100	18	0.48	45	1.50
8	150	28	0.56	70	1.75
9	200	38	0.64	90	1.90

基于电磁有限元模型以及所设计的正交试验,分别做 81 次独立的有限元仿真,由于该电动振动台动圈受到的三向等效电磁力矩相对较小,故本文仅考虑每组工况动圈所受到的分别沿 x 、 y 、 z 坐标轴方向的三向等效电磁力 F_x 、 F_y 、 F_z 。

2.4 影响因素显著性分析

由于本文考虑的 5 个影响因素取值大小相差较大,且对等效电磁力的影响具有非线性效应,为了获取 5 个因素的重要程度,在等效电磁力计算时剔除影响较小的因素,本文进行了因素影响显著性分析,且可以反映各因素之间的交互作用^[17]。

对于本文设计的正交试验,各影响因素自由度为 8,试验误差自由度为 40,定义 F 为各影响因素均方和与误差均方和的比值,用于衡量各因素对等效电磁力的影响显著性,得到 I 、 z 、 α 、 θ 及 d' 等 5 个因素对等效电磁力的影响显著性分析结果,如表 2 所示。

表 2 5 个影响因素对等效电磁力的显著性分析结果

等效 电磁力	F				
	I	z	α	θ	d'
F_x	0.34	1.47	1.47	0.16	0.38
F_y	24.30	3.85	0.07	0.05	0.04
F_z	24 454.44	0.08	1.80	1.19	1.17

根据 F 分布分位数表^[24], F 分布的临界值 $F_{0.99}(8,40)=2.99$, $F_{0.75}(8,40)=1.35$,因此,由表 2 可见:对于 F_x , z 和 α 影响较为显著;对于 F_y , I 和 z 影响较为显著;对于 F_z , I 影响极为显著; θ 和 d'

对各等效电磁力影响均不显著。由于 I 对 F_y 及 F_z 均有显著影响,在工程中便可通过合理控制动圈电流来获取期望的电动振动台垂向及横向振动响应。

3 等效电磁力样本拟合

为了进一步获得动圈全运动工况等效电磁力,对 81 组电磁有限元仿真结果样本进行拟合。由 2.4 中分析可见,各因素对动圈等效电磁力影响显著性不同,且 θ 和 d' 对三向等效电磁力影响显著性均较小,故本文仅考虑 I 、 z 及 α 等 3 个因素,基于正交试验结果,采用 BP 神经网络方法进行样本数据拟合,以快速获取动圈全运动工况等效电磁力。

本文采用的神经网络结构如图 7 所示,输入层包括 3 个神经元,分别为 I 、 z 、 α ;同时为了提高 F_x 、 F_y 及 F_z 的拟合精度,对 F_x 、 F_y 及 F_z 分别训练神经网络,即网络输出层仅包括 1 个神经元,为 F_x 、 F_y 或 F_z ;隐含层根据 Kolmogorov 定理设定包含 7 个神经元,训练算法采用 L - M 优化算法;将 81 组仿真结果随机选取 8 组作为测试集,其余 73 组作为初始训练集,同时为了增加训练样本数目,提高网络的泛化能力,对初始训练集进行二维插值扩充,获得 300 组训练样本。

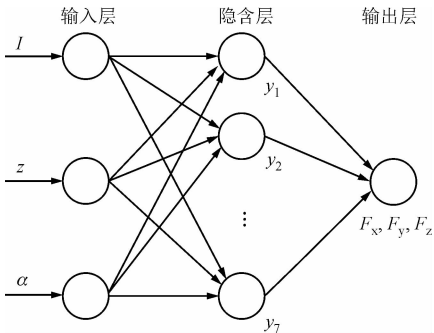


图 7 神经网络结构

为衡量训练后得到的神经网络有效性,计算测试集 8 组数据的相对误差及决定系数,结果如表 3 所示。其中,相对误差公式如下

$$E_i = \frac{|\hat{F}_i - F_i|}{F_i}$$

(8)

式中: E_i 为等效电磁力相对误差; $\hat{F}_i$ 为等效电磁力神经网络输出结果; F_i 为等效电磁力仿真结果。

决定系数公式如下

$$R^2 = \frac{(n \sum_{i=1}^n \hat{F}_i F_i - \sum_{i=1}^n \hat{F}_i \sum_{i=1}^n F_i)^2}{[n \sum_{i=1}^n \hat{F}_i^2 - (\sum_{i=1}^n \hat{F}_i)^2][n \sum_{i=1}^n F_i^2 - (\sum_{i=1}^n F_i)^2]}$$

(9)

式中: R^2 为决定系数; n 为测试集组数,值为 8。

表 3 神经网络对测试集的相对误差及决定系数

等效电磁力	相对误差 最大值/%	相对误差 平均值/%	决定系数
F_x	9.46	5.35	0.998 0
F_y	8.65	4.05	0.998 6
F_z	2.81	1.66	0.999 9

由表 3 可知,训练得到的神经网络在测试集上的相对误差均小于 10%,平均值小于 6%,且决定系数接近于 1,说明有较好的拟合和预测效果,可以用于获取电动振动台动圈全运动工况等效电磁力。

综上所述,进一步归纳得到本文动圈全运动工况等效电磁力计算方法流程框图,如图 8 所示。

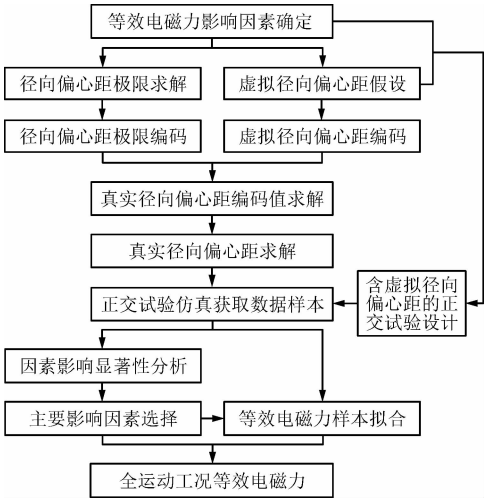


图 8 等效电磁力计算方法流程框图

4 等效电磁力规律分析

为进一步揭示各个影响因素对等效电磁力的影响机理和规律,为今后准确建立电动振动台机电耦合模型及分析等效电磁力对横向振动的影响奠定基础,本文提取部分工况下的计算结果,进一步分析 I 、 z 、 α 对等效电磁力的影响规律。

4.1 动圈径向等效电磁力规律分析

由于动圈翻转偏心为主要偏心影响因素,根据动圈受力的电磁学原理,动圈绕 x 轴翻转主要引起 y 向的径向等效电磁力,且根据 81 组电磁有限元仿真结果,75% 工况点 F_x 量级小于 F_y 的 20%,故动圈绕 x 轴翻转偏心工况下 F_y 为主要径向等效电磁力,因此对径向等效电磁力主要分析 F_y 的规律。

令 $z=0$ mm,绘制 F_y 随 I 、 α 变化的三维响应面如图 9 所示;令 $\alpha=0.32^\circ$,绘制 F_y 随 I 、 z 变化的三

维响应面如图 10 所示。

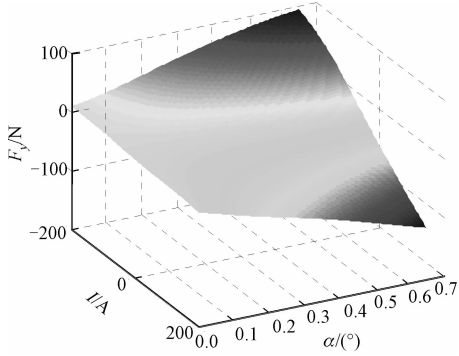


图 9 F_y 随 I 、 α 变化的三维响应面

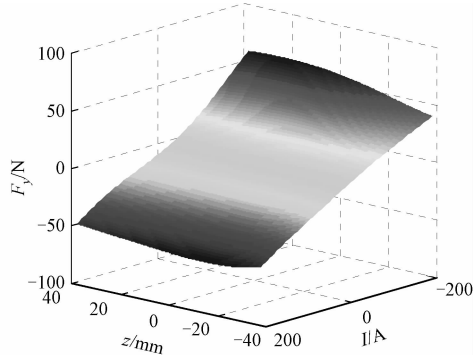


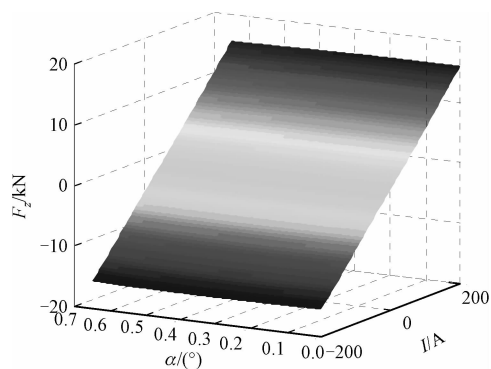
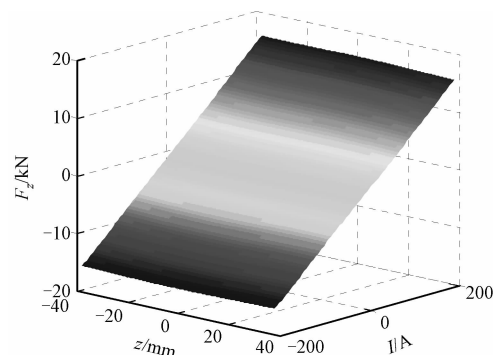
图 10 F_y 随 I 、 z 变化的三维响应面

由图 9 及图 10 可见,在翻转方向一定时, F_y 的方向主要由 I 的方向决定;而在 I 及 z 一定时,随着 α 增加, F_y 的量级逐渐增大。通过分析可知,动圈偏心虽然不会引起气隙长度变化,但当动圈存在绕 x 轴翻转偏心时,根据左手定则判断动圈电流元会受到径向电磁力分量,每个电流元叠加后动圈会受到沿 y 方向的不平衡径向等效电磁力,可见动圈翻转偏心是导致 F_y 产生的根本原因;而由图 9 可知,大电流工况会使径向等效电磁力随翻转偏心角度的增加而更迅速增加,即电流对径向等效电磁力存在放大作用。因此,为了减小径向等效电磁力及其影响,必须提高振动台横向支承刚度,防止动圈在工作中发生大的偏心,同时对动圈通电电流进行控制时也需考虑其对径向等效电磁力的影响。

此外,由图 10 可见,因为电动振动台上下磁路结构不对称以及气隙边缘处的磁密变化, z 的变化也会导致 F_y 的变化,且变化规律与电流方向有关,存在一定的耦合作用。

4.2 动圈垂向等效电磁力规律分析

令 $z=0$ mm,绘制 F_z 随 I 、 α 变化的三维响应面如图 11 所示,令 $\alpha=0.32^\circ$,绘制 F_z 随 I 、 z 变化的三维响应面如图 12 所示。

图 11 F_z 随 I 、 α 变化的三维响应面图 12 F_z 随 I 、 z 变化的三维响应面

由图 11 及图 12 可见, F_z 的方向主要由 I 的方向决定, 而 F_z 与 I 成正比, 随 z 和 α 变化的波动较小, 可见该型电动振动台可以保证 F_z 随 I 稳定变化, 通过动圈通电电流控制可获得期望的垂向工作特性。但由于 F_z 量级较大, 当运动系统质心发生径向偏移时由 F_z 导致的翻转力矩对振动台横向振动的影响则不可忽视。

5 结 论

本文针对电动振动台横向振动问题, 提出了一种考虑动圈偏心的电动振动台等效电磁力计算方法, 主要结论如下:

(1) 综合考虑了动圈通电电流、垂向位置、翻转偏心角度、径向平移偏心距及方向等 5 个因素, 通过合理的正交试验设计解决了多个因素水平取值存在相互约束的问题, 并发现前 3 个因素对等效电磁力影响显著; 通过神经网络进行了动圈等效电磁力样本拟合, 网络在测试集上的相对误差均小于 10%, 可以满足工程要求, 该方法也适用于其他相似的运动系统受力计算问题;

(2) 相比于电磁有限元仿真每一工况点 12 h 的计算时间, 本文提出的方法可以在只进行部分样本点有限元仿真的基础上, 快速获取动圈全运动工况

下等效电磁力数值, 解决了由有限元及精确解析方法计算等效电磁力速度慢所导致的无法进行电动振动台电磁-结构双向耦合仿真的问题;

(3) 基于对动圈等效电磁力规律分析发现, 径向等效电磁力主要随翻转偏心角度增加而增加, 且大电流工况增加更迅速, 故在电动振动台建模与横向振动特性分析中必须考虑动圈偏心带来的影响。

在实际应用本文方法时, 需首先建立考虑横向振动的电动振动台多体动力学模型, 并将等效电磁力施加在动圈质心位置, 在动圈运动过程中根据本文训练得到的神经网络模型实时获取当前工况及位置处的等效电磁力来进行驱动, 即可实现电动振动台电磁-结构双向耦合仿真。本文研究结果可为剖析电动振动台横向振动机理及相关控制算法奠定基础。

参考文献:

- [1] MACHADO M R, APPERT A, KHALIJ L. Spectral formulated modelling of an electrodynamic shaker [J]. Mechanics Research Communications, 2019, 97: 70-78.
- [2] WAIMER S, MANZATO S, PEETERS B, et al. Modelling and simulation of a closed-loop electrodynamic shaker and test structure model for spacecraft vibration testing [J]. Advances in Aircraft and Spacecraft Science, 2018, 5(2): 205-223.
- [3] HOFFAIT S, MARIN F, SIMON D, et al. Measured-based shaker model to virtually simulate vibration sine test [EB/OL]. [2019-09-16]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351988616300057>.
- [4] SEBASTIEN H, FREDERIC M, DANIEL S, et al. Virtual shaker testing at V2i: measured-based shaker model and industrial test case [C]// 27th International Conference on Noise and Vibration Engineering. Leuven, Belgium: KU Leuven, 2016: 1013-1026.
- [5] 孟繁莹. 大型电动振动台动力学分析与数值模拟研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013: 31-32.
- [6] JONATHAN M, KRISTOF H. Two-port modeling and simulation of an electrodynamic shaker for virtual shaker testing applications [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 460: 114835.
- [7] SARASWAT A, TIWARI N. Modeling and study of nonlinear effects in electrodynamic shakers [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 85: 162-176.
- [8] JONATHAN M, KRISTOF H. Virtual shaker model-

- ing and simulation, parameters estimation of a high damped electrodynamic shaker [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 151: 375-384.
- [9] 刘源,董立珉,孔宪仁,等. 飞行器虚拟振动试验平台构建 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1258-1264. LIU Yuan, DONG Limin, KONG Xianren, et al. Construction of virtual vibration testing platform for spacecraft [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1258-1264.
- [10] 左曙光,黄荣奎,冯朝阳,等. 考虑非线性电磁分布力的虚拟电动振动系统建模 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(2): 152-158. ZUO Shuguang, HUANG Rongkui, FENG Zhaoyang, et al. Construction of a virtual electric vibration system considering the nonlinearity of electromagnetic force [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(2): 152-158.
- [11] WANG J, ZHU J G. A simple method for performance prediction of permanent magnet eddy current couplings using a new magnetic equivalent circuit model [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(3): 2487-2495.
- [12] 刘强,赵勇,曹建树,等. 新型微框架磁悬浮飞轮用洛伦兹力磁轴承 [J]. *宇航学报*, 2017, 38(5): 481-489. LIU Qiang, ZHAO Yong, CAO Jianshu, et al. Lorentz magnetic bearing for novel vernier gimbaling magnetically suspended flywheel [J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(5): 481-489.
- [13] 吴承喜. 基于电磁-结构耦合的电动振动系统建模与分析 [D]. 上海: 同济大学, 2018: 23-28.
- [14] 钟鸿敏,左曙光,吴旭东,等. 电励磁爪极发电机气隙磁场与径向电磁力的解析计算模型 [J]. *电工技术学报*, 2017, 32(7): 49-58. ZHONG Hongmin, ZUO Shuguang, WU Xudong, et al. Analytical calculation model of air-gap magnetic field and radial electromagnetic force of electric excitation claw-pole generator [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(7): 49-58.
- [15] JABBARI A. Analytical modeling of magnetic field distribution in multiphase H-type stator core permanent magnet flux switching machines [J]. *Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Electrical Engineering*, 2019, 43: 389-401.
- [16] JING L B, HUANG Z X, GONG J. Analytical calculation of magnetic field distribution in the consequent pole bearingless PM motor with rotor eccentricity [J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2019, 81: 137-147.
- [17] 左曙光,刘洋,邓文哲. 轴向磁通轮毂电机电磁力波灵敏度分析和优化 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(11): 2423-2430. ZUO Shugang, LIU Yang, DENG Wenzhe. Sensitivity analysis and optimization of electromagnetic force wave of an axial-flux in-wheel motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(11): 2423-2430.
- [18] ZUO S G, LI D Q, MAO Y, et al. Longitudinal vibration analysis and suppression of electric wheel system driven by in-wheel motor considering unbalanced magnetic pull [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2019, 233(11): 2729-2745.
- [19] NIU X X, YANG C L, WANG H C, et al. Investigation of ANN and SVM based on limited samples for performance and emissions prediction of a CRDI-assisted marine diesel engine [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 1353-1364.
- [20] TAFARROJ M M, KOLAHAN F. A comparative study on the performance of artificial neural networks and regression models in modeling the heat source model parameters in GTA welding [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2018, 131: 111-118.
- [21] 叶建雄,李志刚, WU J, 等. 基于 SVR 模型的水下焊接最佳工艺 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(12): 69-72, 94. YE Jianxiong, LI Zhigang, WU J, et al. Optimal underwater welding process based on SVR model [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(12): 69-72, 94.
- [22] 王枫,陈征,李花,等. 采用多体动力学的压缩机曲轴结构优化 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(3): 7-13. WANG Feng, CHEN Zheng, LI Hua, et al. Optimization for compressor crankshaft by multi-body dynamics analysis method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(3): 7-13.
- [23] 梁昭磊. 受限条件下的试验设计研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009: 38-40.
- [24] 陆宜清. 概率论与数理统计 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019: 136-137.

(编辑 刘杨)