

电机定子参数化建模及声学模态 DOE 分析

Parametric Modeling and DOE Analysis of Acoustic Modal of E-propulsion Motor Stator

张剑

(上海汽车集团股份有限公司商用车技术中心)

摘要: 本文根据某车用驱动电机主要设计参数, 采用 ANSYS Mechanical 软件参数化建立定子总成模态计算仿真模型。以关键定子设计参数, 如绕组槽宽度、绕组槽高度、绕组槽开口宽度及定子轭部厚度为控制因子, 进行定子总成零阶呼吸模态 DOE 分析。分析结果表明: 绕组槽宽度对零阶呼吸模态影响最大, 其次是轭部厚度, 绕组槽开口宽度对零阶呼吸模态无明显影响。为解决工程上频发的, 因定子总成零阶呼吸共振引起的高速电机啸叫问题以及低噪声驱动电机设计提供理论参考。

关键词: 电机定子; 参数化; 模态; DOE

Abstract: Parametric modal modeling of motor stator has been performed by a lot of design parameters base on ANSYS Mechanical software. Control factors such as the width of winding slot, the height of winding slot, the width of winding slot hole and the thickness of yoke have been determined to DOE analysis of motor stator breath modal. The analysis result can be summarized: The width of winding slot is the most sensitive parameter, the thickness of yoke is the second sensitive role and the width of wingding slot hole has little effect on stator breath modal. It is positive to solve high rpm motor NVH problem generated by stator breath resonance, and it is also helpful to low acoustic design for E-propulsion motor.

Key words: motor stator; parametric; breath modal; DOE

0. 引言

车用驱动电机高速工况时, 频繁发生阶次径向力激振频率与定子零阶固有频率吻合, 引起定子总成零阶呼吸共振, 产生电机高速啸叫问题, 严重影响整车品质及用户体验。因此有必要分析电机定子零阶模态影响因素, 特别是有效识别关键设计参数对零阶呼吸模态的灵敏度。在设计初期, 通过低噪声电机设计尽量避免可能产生的 NVH 问题。在设计后期, 通过工程手段有效控制电机定子共振, 降低噪声水平, 提升整车舒适性。

电机定子是电磁噪声的主要辐射体, 定子结构的准确建模是研究电磁振动和噪声的关键, 定子定子在电机的电磁振动噪声优化方面, 主要有 2 个出发点: ①优化径向电磁力波的特性; ②改善定子结构的传递特性。定子结构的优化设计是降低振动噪声的一个重要途径。本文基于参数化建模, 进行定子总成模态分析, 重点关注声学贡献量最大的模态, 分析固有频率及振型。基于 DOE(design of experiments)设计定子总成零阶呼吸模态控制因子正交试验, 快速验证正交试验结果, 研究定子设计参数灵敏度, 为低噪声驱动电机设计及解决因电机零阶共振引起的高速啸叫问题提供理论依据。

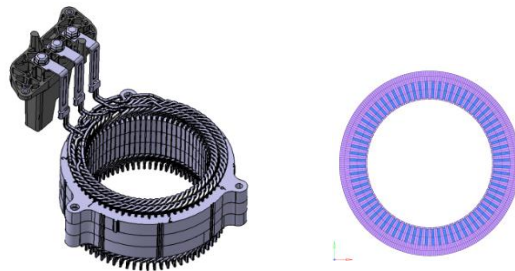
1. 参数化建模

基于参数化模型，可有效地进行后续的影响因素分析以及定子的优化设计。单因子控制变量法快速地修改仿真模型，提高灵敏度分析效率。本文在圆柱坐标系下，以主要建模参数为自变量，参数化定义模型各个单元节点坐标，文本文件输入到 ANSYS Mechanical 中进行模态计算及后处理。参数化建模所用设计参数如表 1 所示：

表 1 电机定子主要设计参数

参数	数值[mm]
定子铁心内径	70
定子铁心外径	101
绕组槽上宽度	2.784
绕组槽高度	17.945
绕组槽下宽度	2.8
绕组槽开口宽度	1
定子铁心轭厚	11.25

根据文献 1 及文献 2 的结论，绕组槽底部与铁心轭部过渡圆角及定子铁心长度对定子总成模态影响较小，故定子总成参数化建模简化为平面应变问题，且忽略过渡圆角。定子与绕组通过共节点连接，约束 2D 单元轴向位移。模型全部采用一阶四边形单元，定子总成 2D 有限元模型包含 1800 节点 1296 单元，其中定子 1152 单元，绕组 144 单元。定子总成数模及有限元模型如图所示，定子由硅钢片叠加而成，绕组为铜线圈，材料定义忽略非线性因素的影响。

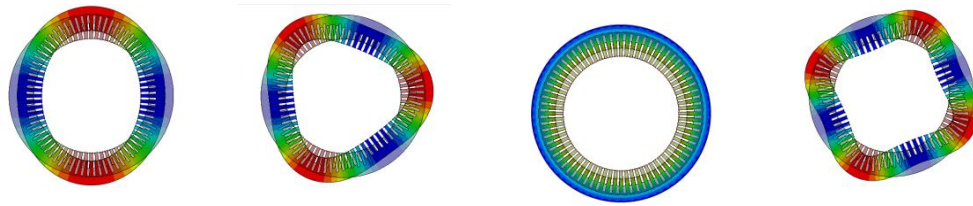


2. 定子总成模态分析

模态声学贡献量代表了各阶模态在电机辐射噪声中的重要程度。根据实际工程经验及 NVH 测试结果，零阶模态对于电机高速啸叫的声学贡献量最大，呼吸振型对噪声敏感度最高。电机定子总成声学模态 DOE 分析，应关注零阶呼吸模态。

前四阶定子总成模态计算结果如图所示，其中二阶模态振型表现为径向椭圆形变形，固有频率 1449HZ；三阶模态振型表现为径向三角形变形，固有频率 3785HZ；零阶模态振型表

现为径向呼吸变形，零阶固有频率 6220HZ；四阶模态振型表现为径向四边形变形，固有频率 6665HZ。



3. 声学模态 DOE 分析

3.1 正交试验设计

试验设计(Design Of Experiments, 简称 DOE)是一种安排试验和分析试验数据的数理统计方法。通过对试验的合理安排,能以较小的试验规模和较少的试验次数,较短的试验周期和较低的试验成本,得到理想的试验结果和得出科学的结论。试验设计的基本程式是:一设计、二分析。设计就是设计试验方案,主要体现于试验方案设计的全过程;而分析主要是试验结果处理或试验数据分析,也包括对方案设计的最优化分析。

常用试验设计分析方法有正交列表、方差分析、极差分析法等。本文对于声学模态 DOE 分析,正交试验设计为四因子三水平 L₉(3⁴),即定义四个控制因子,分别为绕组槽宽度、绕组槽高度、绕组槽开口宽度及铁心轭部厚度。每个控制因子选取三个水平,以水平 2 为基准,水平 1 在水平 2 的基础上降低 5%,水平 3 在水平 2 的基础上增加 5%。各控制因子水平数值如表 2 所示,响应变量为定子模态零阶固有频率。

表 2 控制因子水平

控制因子	水平 1	水平 2	水平 3
绕组槽宽度[mm]	2.6524	2.792	2.9316
绕组槽高度[mm]	17.04775	17.945	18.84225
绕组槽开口宽度[mm]	0.95	1	1.05
定子铁心轭厚[mm]	10.6875	11.25	11.8125

四因子三水平组成的正交试验列表如表 3 所示,共 9 组试验组合。根据 9 组试验组合的响应变量结果及目标优化特性,可分析控制因子灵敏度及估计 81 组总体组合里的最优解。

表 3 正交试验列表

正交试验	控制因子水平
------	--------

	绕组槽 宽度 A	绕组槽 高度 B	绕组槽 开口宽 C	铁心轭部 厚度 D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

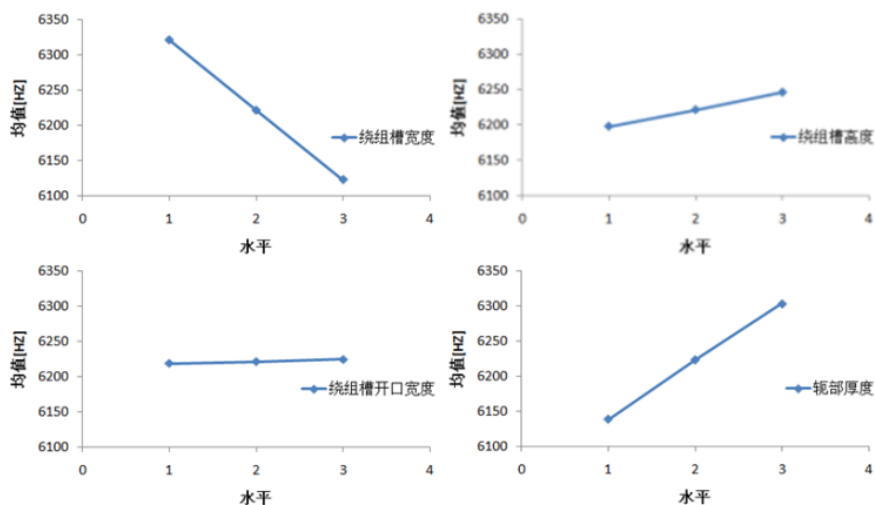
3.2 正交试验分析

9 组正交试验对应的响应变量，即零阶模态固有频率如下表 4 所示。固有频率介于 6063HZ 及 6430HZ 之间，初始控制因子组合 A2B2C2D2 对应的零阶固有频率 6220HZ，响应变量零阶固有频率目标优化为望大特性，即最优解为零阶固有频率最大的试验组合。

表 4 正交试验结果

正交试验	模态固有频率[HZ]
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁
2	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂
3	A ₁ B ₃ C ₃ D ₃
4	A ₂ B ₁ C ₂ D ₃
5	A ₂ B ₂ C ₃ D ₁
6	A ₂ B ₃ C ₁ D ₂
7	A ₃ B ₁ C ₃ D ₂
8	A ₃ B ₂ C ₁ D ₃
9	A ₃ B ₃ C ₂ D ₁

计算四个控制因子各水平的模态固有频率均值，分析控制因子对定子模态的灵敏度。不同控制因子，如绕组槽宽度、绕组槽高度、绕组槽开口宽度及轭部厚度随各自水平变化的模态固有频率均值，如图所示。控制因子对零阶模态固有频率的灵敏度，可由固有频率均值的斜率反映，斜率越大，灵敏度越高。各控制因子水平的零阶模态固有频率均值分析结果表明：根据响应变量目标优化的望大特性，最优试验组合为 A1B3C3D3，即绕组槽宽度取最小、绕组槽高度取最大、绕组槽开口宽度取最大及轭部厚度取最大时，对应的定子模态固有频率最大。A1B3C3D3 组合刚好出现在 9 组正交试验列表中，最大模态固有频率 6430HZ。



关键设计参数对零阶呼吸模态的灵敏度结果为：绕组槽宽度对定子总成零阶模态影响最大，其次为定子铁心轭部厚度，再次为绕组槽高度，绕组槽开口宽度对零阶模态无明显影响。对于指定的定子内、外径，减小绕组槽宽度、增大轭部厚度有利于提升定子总成零阶模态固有频率。

4. 结论

本文基于参数化建模方法，建立了包含定子铁心及绕组的定子总成有限元模型，进行定子总成模态分析。针对电机高速啸叫声学贡献量最大的电机定子零阶呼吸模态，通过 DOE 方法分析关键设计参数对零阶呼吸模态的灵敏度，结论如下：

- 1) 零阶呼吸模态阶次介于三阶三角形模态与四阶四边形模态之间，属于电机本体高频模态，容易在高转速段引起共振；
- 2) 绕组槽宽度对定子零阶呼吸模态影响最大，绕组槽宽度越大，零阶呼吸模态频率越小；定子铁心轭部厚度对定子零阶呼吸模态有较大影响，轭部厚度越大，零阶呼吸模态频率越大；
- 3) 低噪声电机设计过程中，应重点关注绕组槽宽度及铁心轭部厚度对噪声的影响；
- 4) 绕组槽开口宽度对定子零阶呼吸模态无明显影响；
- 5) DOE 方法可有效识别关键设计参数对定子零阶声学模态的灵敏度，并指导低噪声电机设计方案制定。

5. 参考文献

- [1] 左曙光, 张耀丹, 阎礁, 张国辉, 林福, 吴双龙. 考虑定子各向异性的永磁同步电机振动噪声优化[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51 (5) .
- [2] 何吕昌, 左曙光, 马琮淦, 文歧华, 魏欢, 相龙洋. 永磁电机定子参数化建模及结构灵敏度分析[J]. 微电机, 2012, 45 (9) .
- [3] 王晋鹏, 常山, 刘更, 吴立言, 常乐浩. 基于模态声学贡献量的减速箱降噪技术研究

[J]. 振动与冲击, 2015, 34 (17) .