



船舶柴油机附加电机模态优化研究

葛冀欢, 徐立, 王启富

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为了在船舶柴油机附加电机设计阶段就能预测电机的振动水平, 及在发生振动问题时能提出合理的解决方案, 对船舶柴油机附加电机进行模态优化设计研究。对 200 kW 柴油机的附加电机建立有限元模型, 通过软件 ANSYS 求解器进行计算。计算结果与试验结果的比较表明: 该有限元计算方法有效, 可为船舶柴油机附加电机的瞬态振动分析、噪声预测以及优化设计提供技术支持。

关键词: 柴油机; 电机; 有限元法; 模态分析

中图分类号: TK421+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)03-0048-04

Optimization Study on the Modal of Additional Motor of Marine Diesel Engine

Ge Jihuan, Xu Li, Wang Qifu

(School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: In order to predict the vibration level of the motor in the design stage of the marine diesel engine additional motor, and to propose reasonable solutions when the vibration problem occurs, the optimization study on the modal of additional motor of marine diesel engine was carried out. The finite element model of the 200 kW motor was calculated by using the ANSYS solver. The comparison between the calculation results and the experiment results verified the validity of the finite element method, and proved that the method could provide technical support for the transient vibration analysis, noise prediction and the optimal design of the motor.

Key words: diesel engine; motor; finite element method; modal analysis

0 引言

当今人们对减少噪声污染的要求日益强烈^[1]; 与此同时, 现代电机正朝着大电流高磁密的方向发展, 使电机产生比较大的电磁噪声。电机的振动是造成电机噪声的主要原因之一, 并且电机振动给电机-负载系统的安全可靠运行带来很大的危害^[2]。因此, 有必要对电机振动问题进行深入研究。

在大型交流电机的使用过程中, 有时会发生电机振动严重超标的情况, 如何在电机设计阶段就能预测电机的振动水平, 或发生振动问题时能提出合

理的振动解决方案, 是电机生产企业迫切需要解决的问题^[3,4]。而如何准确地计算大型交流电机定子模态特性, 以便进行合理的结构设计, 降低电机的振动与噪声水平是研究重点。

本文对 200 kW 柴油机的附加电机建立有限元模型, 通过软件 ANSYS 求解器进行计算。该有限元模型不仅可应用于电机静止状态下模态的计算, 也是电机工作状态下相关有限元计算的基础。采用 Hypermesh 软件进行网格划分。

收稿日期: 2015-10-25; 修回日期: 2016-01-16
基金项目: 自主创新研究基金 (2014-ND-B1-04)。
作者简介: 葛冀欢(1994-), 男, 学士, 主要研究方向为船舶动力设计, E-mail: gejihuanwhut@163.com。

1 电机的模态分析

1.1 模态分析理论

模态分析是研究结构动力特性的一种方法，是系统辨别方法在工程振动领域的应用。模态是机械结构的固有振动特性，每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型，这些模态参数可以通过计算或者试验分析得到，而计算或试验过程就称为模态分析。根据振动理论，多自由度系统以某个固有频率振动时所呈现出的振动形态称为模态，此时各点位移存在一定的比例关系，称为固有振型。对于一个具有 N 自由度的线性系统^[7]，其运动微分方程：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{X}=\boldsymbol{F}(t)$$

(1)

式中： $\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵； $\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵； $\boldsymbol{X}$ 为位移向量； $\boldsymbol{F}(t)$ 为作用力向量， t 为时间； $\boldsymbol{C}$ 为阻尼系数。

当 $\boldsymbol{F}(t)=0$ 时，忽略阻尼 $\boldsymbol{C}$ 影响，方程变为：

$$\boldsymbol{W}\ddot{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{X}=0$$

(2)

自由振动时结构上各点做简谐振动，各点位移 $\boldsymbol{X}$ 为：

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{\Phi}\cdot e^{j\omega t}$$

(3)

由式 (2)、(3) 得：

$$(\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\Phi}=0$$

(4)

根据以上公式求出 ω^2 和 $\boldsymbol{\Phi}$ ，其中 $\omega=2\pi f$ ， f 为频率，求得的系统各阶固有频率便是模态频率，固有振型便是模态振型。

1.2 模型的建立

结构有限元网格的数量和质量会影响仿真计算的计算规模和精确度。本文根据 HyperMesh 默认的网格质量标准对电机进行网格划分。由于体网格都是在面网格的基础上生成的，因此单元质量的检查主要是针对面网格进行。划分网格时要权衡计算精度及求解速度这两方面的因素。在计算数据变化梯度较大的部位（如应力集中的地方），采用比较密集的网格；在计算数据变化梯度小的部位则采用较稀疏的网格。具体如下：

机座外壳采用节点耦合模拟焊接；端盖与机座间、端盖与轴承套之间以及轴承套与轴承内外盖之间均采用 ECV 模拟螺栓连接；小侧板与机座间采用 Beam188 单元模拟螺栓连接，螺栓孔以及压缩锥之外的区域设置默认的接触参数；定子铁芯与机座间的接触采用绑定接触；定、转子铁芯和绕组采用节点位移耦合；定子端部绕组采用实体建模；滚

动轴承的建模基于 Hertz 接触理论和线性弹簧单元；轴承内圈和转子轴、轴承外圈和轴承套采用 MPC 绑定接触。电机的有限元模型如图 1 所示。

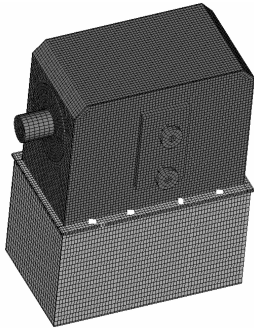


图 1 电机有限元模型

1.3 有限元模型的计算

将有限元模型导入到 ANSYS 中，设置求解类型为模态分析，对其进行计算。同时利用试验的方法得到试验结果，将仿真模态与试验模态的前 10 阶进行对比，如图 2、3 及图 4~13 所示。

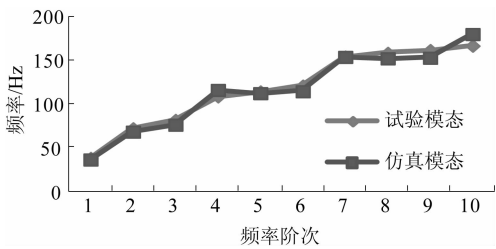


图 2 仿真与试验模态频率比较

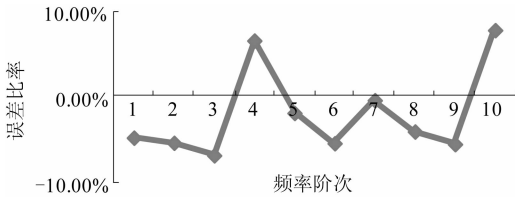
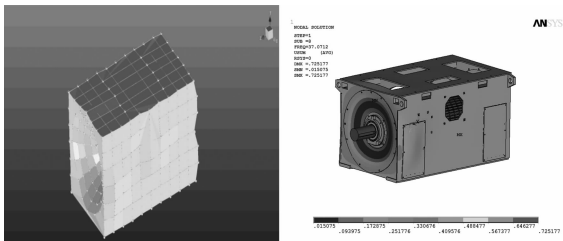


图 3 仿真与试验模态频率误差

由仿真结果与试验结果对比可知：仿真计算所得的固有频率与试验值的相对误差小于 10.35%，结果较吻合；但是计算得出的模态振型幅值要高于试验所得的模态振型幅值。



(a)试验第一阶振型 (b)仿真第一阶振型

图 4 试验与仿真第一阶振型

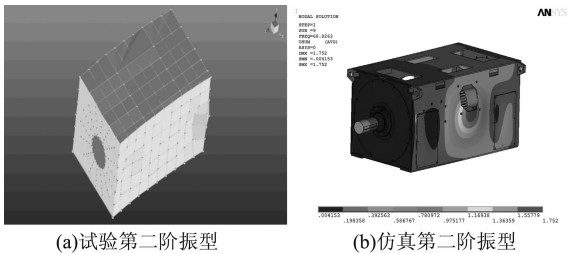


图 5 试验与仿真第二阶振型

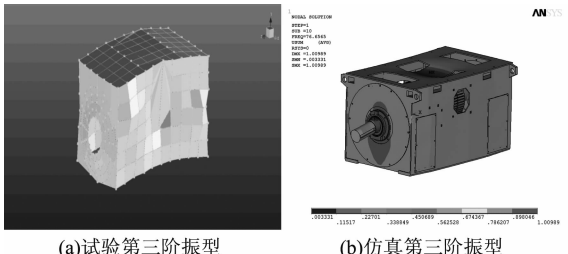


图 6 试验与仿真第三阶振型

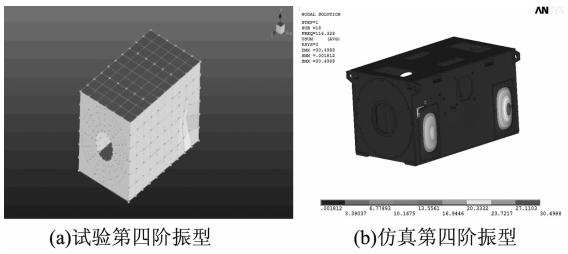


图 7 试验与仿真第四阶振型

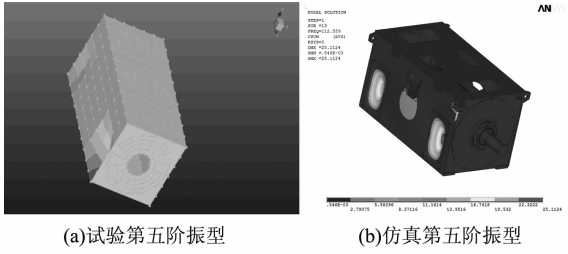


图 8 试验与仿真第五阶振型

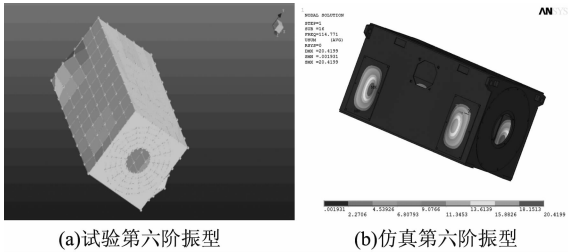


图 9 试验与仿真第六阶振型

从振型图可以看出,电机的低阶模态主要为驱动端端盖的呼吸模态、机座整体的左右摆动和上下摆动以及小侧板的模态。其中整体模态振型的参与质量和振动能量均较大,特别是低阶整体模态,需要重点关注,在优化电机结构时,应使电机固有

频率避开主要激励力频率。

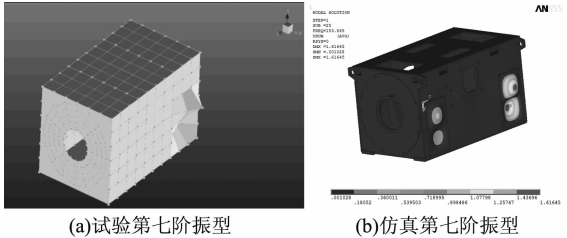


图 10 试验与仿真第七阶振型

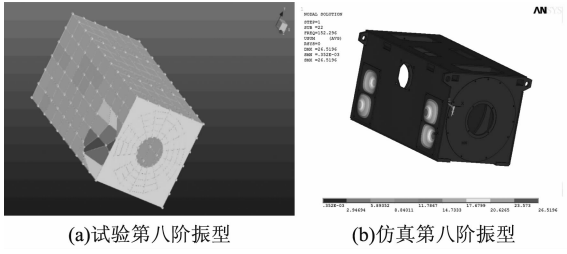


图 11 试验与仿真第八阶振型

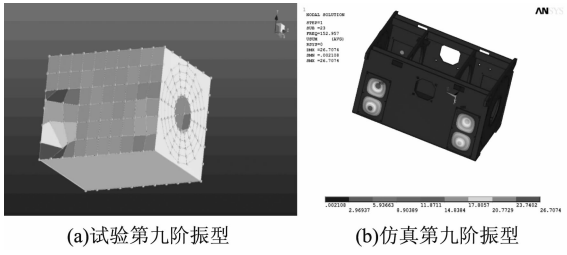


图 12 试验与仿真第九阶振型

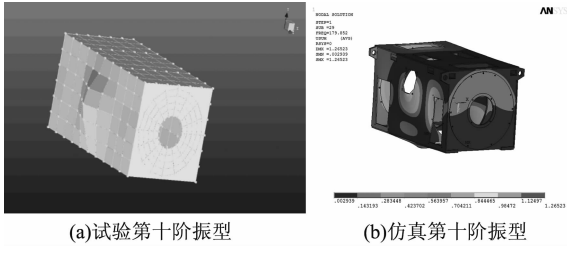


图 13 试验与仿真第十阶振型

第一阶振型($f=37.1\text{ Hz}$)为驱动端端盖呼吸模态和电机整体平动。机座盖板处基本没有位移变化,这是由于驱动端轴承是无挡圈的滚柱轴承,它主要承受径向力,但是由于滚动体与轴承的内外圈之间有油膜存在,使得滚动体、油膜、内外圈之间存在一定的摩擦力,在轴向力没有到达静摩擦力的上限时,轴承所受的轴向力都可以由摩擦力抵消掉,因此会出现这种振型。

第二阶振型($f=68.8\text{ Hz}$)为电机整体左右平动,并伴随电机中部的一阶左右弯曲振动。整个电机的最大弯曲发生在机体中部侧板,因此侧板容易疲劳。在进行振动噪声控制时,可针对具体情况增加侧板的刚度,从而降低这部分的局部振动。

第三阶振型 ($f=76.7\text{ Hz}$) 为电机整体上下平动, 同时伴随电机中部的一阶上下弯曲振动。整个电机的最大弯曲发生在机体中部顶板, 因此顶板容易发生疲劳。

第四、五、六阶振型 ($f=114.4、112.6、115.5\text{ Hz}$) 均发生在小侧板, 都是一阶局部模态。由于它与机座接触面积小, 连接刚度较弱, 且内外侧没有约束, 所以会存在该阶局部模态。在这几阶振型中, 小侧板变形较大。

第七、八、九、十阶振型 ($f=150.9、152.3、153、153.9\text{ Hz}$) 为小侧板二阶局部模态。

2 误差分析

有限元计算结果与试验结果有差异的原因分析如下:

(1) 约束条件之间的差别。在电机的测试试验中, 用弹性绳将机体悬挂起来, 所选择的弹性绳的刚度应使约束系统频率小于机体的第一阶固有频率的 $1/5$ 。实际试验是一种近似的自由状态, 而计算时, 不加任何约束, 是理想的自由状态, 这两种状态的差异会造成计算值与试验值的偏差, 但这种偏差很小。

(2) 电机有限元模型经过了结构简化, 与实际电机有差别。

(3) 电机结构可能存在非线性因素 (如端盖与主轴承盖接触处), 而计算时是按线性系统进行线性求解的, 会造成一些误差; 同时有限元方法本身也会产生离散误差。

(4) 据资料表明: 电机在实际铸造中, 由于冷却速度不同, 可能导致材料特性, 尤其是杨氏模量的不一致, 而在计算时假定材料为均匀的, 也会导致一些偏差。

(5) 在一定频率范围内, 理论分析的固有频率数要多于测试结果。这主要是由于试验时, 为了

识别电机的主要固有频率, 不可能布置太多测点, 因而会测不到一些高阶固有频率和某些局部模态。

3 结 论

(1) 柴油机附加电机有限元计算结果与试验结果误差可接受, 基本都在 10% 以内, 表明电机有限元模型能较好地反映机体的动态刚度特性, 模型简化及处理较为合理。

(2) 从附加电机的振型可以看出: 存在大量局部模态, 且比较密集。大量密集的固有频率和振型位于电机侧板、小侧板等电机的薄弱部位, 且模态振型非常相似。这是因为该电机采用大跨距的薄板壳和框梁结构, 会存在大量非常密集的局部模态, 且许多振型具有相似性, 从理论和试验分析都可以发现这样的现象。

(3) 本文建立的电机有限元模型还可用于其瞬态振动分析、噪声预测以及电机的优化设计中。

参考文献

[1] 王荀, 邱阿瑞. 大中型异步电动机定子模态的仿真分析 [J]. 大电机技术, 2011 (1).

[2] 王天煜, 王凤翔. 大型异步电动机定子振动与模态分析 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (12): 41-45.

[3] 任继红. 高速滚珠轴承的刚度计算与转子-轴承系统的动力学分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.

[4] 冈本纯山. 球轴承的设计计算 [M]. 黄志强. 译. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[5] 张晨彬. 发动机橡胶悬置的研究与优化 [D]. 南京: 东南大学, 2006.

[6] 杨关海. 橡胶减振在摩托车上的应用 [D]. 天津: 天津大学, 2011.

[7] 李小军. 变刚度支撑对船舶轴系横向振动影响分析 [J]. 中国修船, 2015 (3): 34-37.

(上接第 37 页)

参考文献

[1] 中国船级社. 钢制海船入级规范 2012 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

[2] 陈可越. 船舶设计实用手册 [M]. 北京: 中国交通科

技出版社, 2007.

[3] 上海船舶运输科学研究所. Calm Water Model Tests For Sansha NO.1 [R]. 2013.

[4] MAN Diesel & Turbo. 32/40 Project Guide - Marine [R]. 2014.