

# 电动客车直驱永磁同步电机随机振动试验与仿真

王世阳, 陈 闯, 汪海洪

(宇通客车股份有限公司, 郑州 450016)

**摘 要:**针对某客车直驱永磁同步电机接线盒盖板在振动台架试验出现开裂现象,开展随机振动仿真分析和结构优化设计。经仿真和试验验证,盖板新结构强度满足要求。

**关键词:**电动客车;直驱电机;随机振动;仿真分析

中图分类号:U469.72; TM351

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)06-0037-03

## Test and Simulation of Random Vibration for Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Motor of an Electric Bus

WANG Shiyang, CHEN Chuang, WANG Haihong

(Yutong Bus Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

**Abstract:** Aiming at the cracking phenomenon of the junction box cover plate on a bus direct drive permanent magnet synchronous motor in the vibrating bench test, the random vibration simulation analysis and structural optimization design are carried out. By the verification with simulation and test, the new structure of the cover plate meets the strength requirements.

**Key words:** electric bus; direct drive motor; random vibration; simulation analysis

直驱电机作为纯电动城市客车三电系统的核心部件,其结构安全直接影响车辆安全和使用寿命。城市客车在行驶过程中会受到来自地面随机载荷的激励,为保证直驱电机的结构安全,在产品上市前会在振动试验台上开展模拟地面随机载荷的振动试验<sup>[1-6]</sup>。本文针对某款直驱电机开展随机振动试验时出现的接线盒盖板开裂现象,借助 Ansys Workbench 软件开展随机振动 CAE 仿真分析,并进行优化设计和试验验证。

### 1 原产品随机振动试验

依据 GB/T 28046.3—2011《道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第3部分:机械负荷》<sup>[7]</sup>中商用车弹性体严酷等级加载输入载荷谱,单个方向的加载时间是 32 h,加载速度的均方根值为  $57.9 \text{ m/s}^2$ ,电机随机振动试验的功率谱密度值见表 1。

表 1 电机功率谱密度和频率

频率/Hz	功率谱密度/ $[(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})^2\cdot\text{Hz}^{-1}]$
10/20/30	18/36/36
180/2 000	1/1

按照该国标的要求,把原产品电机放置于试验台架上开展随机振动试验。试验时,保证电机在台架中的安装状态和在实际车辆中的安装状态一致。经过一段时间振动后,接线盒盖板发生了断裂现象(如图 1 所示)。从图 1 中可以清晰地看到,在接线盒盖板外侧,靠近盖板折弯处中间位置,有 3 颗螺栓与盖板连接的位置发生了明显的断裂。所以该电机的台架试验不满足要求。

为了保证产品质量,需分析找出断裂的根本原因,然后对结构进行优化,并再次进行台架验证。

收稿日期:2023-07-21。

第一作者:王世阳(1994—),男,硕士;助理工程师;主要从事新能源电机结构分析及轻量化研究工作。E-mail:wangsyi@yutong.com。



图1 振动试验结构件断裂位置

## 2 仿真分析

### 2.1 仿真模型的建立

直驱电机的仿真模型为整机模型,包含前后端盖、壳体、接线盒、定转子铁芯、转轴、轴承等零部件。其中零部件模型的质量、材料及装配方式会影响建模及仿真结果的精确度。但整机建模时如果细节过多,划分网格时会产生质量较差的网格且会造成网格数量庞大,导致求解困难。因此,在进行网格处理前,先对几何模型进行清理,去除对结果影响较小的凸台、小圆角等几何特征,对于质量较大或对模型刚度影响较大的零部件应保留<sup>[8-10]</sup>。

本文采用 Ansys Workbench 软件建立仿真模型。综合考虑计算精度及计算机的运行能力,几何特征比较复杂的零部件采用四面体网格,几何特征相对规则的零部件采用六面体网格,网格尺寸都为 3 mm。整机模型共有 4 587 808 个单元、1 086 021 个节点。各主要部件的部分材料参数见表 2。

表2 电机主要部件部分材料参数

部件	弹性模量/MPa	泊松比	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
端盖	70 000	0.33	2 700
壳体	70 000	0.33	2 700
定转子铁芯	206 000	0.3	7 900
转轴	206 000	0.3	7 860
接线盒盖板	69 000	0.33	2 700

### 2.2 随机振动结构失效仿真分析

#### 2.2.1 模态分析

模态是结构体的固有特性,通过模态分析可得到结构体在不同激励下的动力学响应。约束直驱电机悬置位置和驱动轴结合位置,以模拟其在整车上的装配环境。采用分块兰索斯方法,对电机进行约束模态

分析。

通过 Ansys Workbench 软件仿真分析,求解直驱电机的模态频率,其一、二、三阶频率及振型如图 2~4 所示。

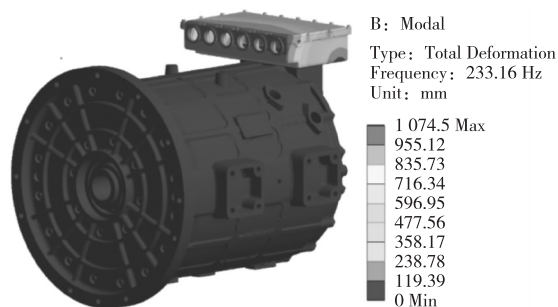


图2 直驱电机一阶模态(频率 233 Hz)

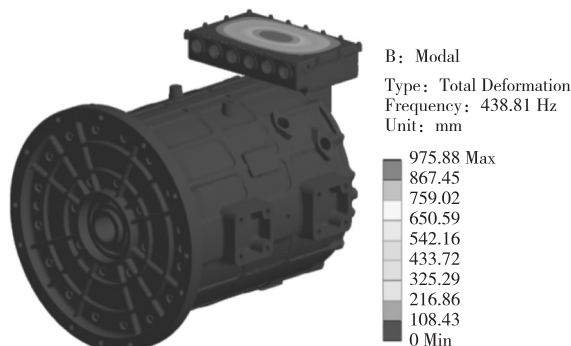


图3 直驱电机二阶模态(频率 438 Hz)

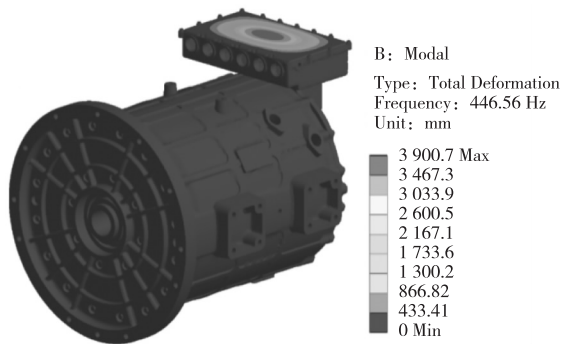


图4 直驱电机三阶模态(频率 446 Hz)

由图 3 和图 4 模态振型可知,第二阶、第三阶模态振型在电机整机断裂结构件位置变形明显,而且第二阶和第三阶模态频率较低且数值比较接近,容易出现与试验激振频率共振现象。

#### 2.2.2 随机振动结构响应仿真分析

随机振动分析一般是给结构体输入随机载荷谱,确定结构产生的响应是否满足设计要求<sup>[11-12]</sup>。其动力学方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$  分别为动力学方程的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵。由于试验激励载荷  $\mathbf{F}(t)$  是随机的, 进行正态归一化处理, 结构体的响应结果在统计学上也是服从高斯正态分布<sup>[13-15]</sup>。

基于前面模态分析的结果, 将第一部分中振动台架试验的载荷谱输入到结构模型进行求解, 采用模态叠加法得到随机载荷下的结构响应。首先对动力学方程式(1)进行模态坐标变换, 求得结构的若干低阶模态, 然后采用式(2)计算结构体的响应:

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\eta} = \sum_{i=1}^m \boldsymbol{\phi}_i \eta_i \quad (2)$$

式中:  $\boldsymbol{\mu}$  为各节点自由度对应的位移向量;  $\boldsymbol{\Phi}$  为主模态矩阵;  $\boldsymbol{\eta}$  为模态坐标向量;  $\boldsymbol{\phi}_i$  为第  $i$  阶模态阵型向量;  $\eta_i$  为第  $i$  阶模态坐标。

通过 Ansys Workbench 软件的模态叠加法求得结构的随机振动响应, 对结果后处理获取直驱电机垂直方向  $3\sigma$  米塞斯应力, 如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 直驱电机在随机振动环境中产生了较大的动态应力响应, 超出了结构的承载能力, 其中接线盒盖板处的最大应力 (72 MPa) 超出了结构使用 5052 材料的疲劳极限 (50 MPa)。

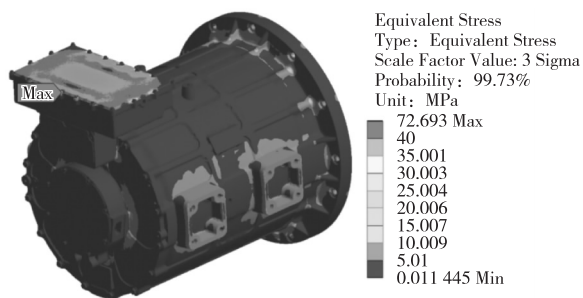


图5 直驱电机垂直方向随机振动应力云图

对比前述振动试验结构件断裂位置 (图 1), 仿真应力较高的区域与此基本一致。

### 3 结构优化及验证

由于接线盒盖板件开裂, 所以需要进行优化。原产品接线盒盖板件是冲压件, 壁厚为 2 mm。本文从工艺和结构两方面开展优化。工艺方面, 由于冲压件存在残余应力, 所以新的接线盒盖板使用铸造工艺替

换冲压工艺; 结构方面, 将接线盒盖板的壁厚增加至 6 mm, 同时在背面进行加筋处理, 以提升盖板的垂向刚度, 同时考虑轻量化需求, 在应力较低的区域设计减重槽, 既满足结构刚度强度又兼顾轻量化。经过随机振动仿真, 原断裂位置处的应力水平降低为 23 MPa, 如图 6 所示。

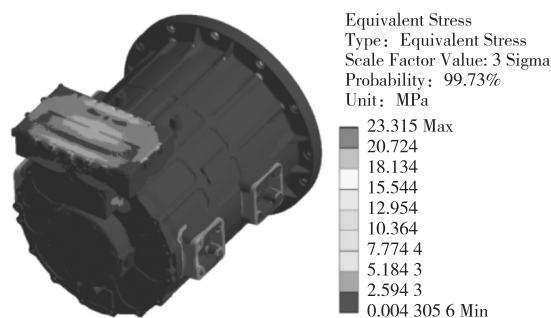


图6 优化结构垂直方向振动应力云图

将优化后的盖板结构装配于电机整机上重新开展台架振动试验。对每个方向进行 32 h 的振动试验后, 检查电机各个部件损伤情况, 无开裂现象, 电机能正常运行。

### 4 结束语

本文针对前期台架振动试验时发生的接线盒盖板开裂现象, 借助 Ansys Workbench 软件建立有限元模型, 并开展随机振动仿真。同时根据实际条件对电机接线盒盖板结构进行优化, 并再次开展随机振动仿真以确保结构强度安全。最后经振动台架试验验证, 结构强度满足要求, 抗振性能良好。

### 参考文献:

- [1] 王丹, 续丹, 曹秉刚. 电动汽车关键技术发展综述[J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 68-72.
- [2] 王玲珑, 湛胜, 章国光, 等. 某车用动力电机结构与仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 97-101.
- [3] 张莉. 某型电子设备机箱振动疲劳分析[J]. 电子机械工程, 2009, 25(1): 1-5.
- [4] 李如忠. 结构随机振动仿真分析[J]. 机械, 2007, 34(5): 21-23.
- [5] 王强, 陈明. 随机振动仿真分析[J]. 光电技术应用, 2009, 24(5): 77-80.

轮 12 000 km,其中高速环道 3 000 km、山路 3 000 km、环路 6 000 km。前端模块功能一切正常。

#### 4 结束语

基于非承载式车身的特点,以及新造型空间和强度的需求,开发了钢塑一体式前端模块。该模块满足整车空间布置要求,同时降低了 34%的重量。通过软模件装车验证、性能试验、CAE 分析以及道路试验等,证明新结构符合要求。

#### 参考文献:

- [1] 严卫卫,张云青. 汽车全塑前端模块结构优化设计[J]. 汽车实用技术,2020(3):65-67.
- [2] 庄京彪. 汽车前端模块设计研究[J]. 汽车零部件,2022(4):47-53.
- [3] 孟小斌. 某车型全塑前端模块骨架的研发[J]. 时代汽车,2003(5):157-159.
- [4] 黄玉东,赵明慧,高志纯,等. 前端模块总成装配方案优化设计[J]. 汽车工艺与材料,2016(12):22-24.
- [5] 费文铮,朱彬. 一种汽车前端模块定位方式探讨[J]. 汽车零部件,2017(11):47-49.
- [6] 邱晨曦,胡琦. 材料创新对前端模块降本减重的可行性分析[J]. 汽车零部件,2015(4):44-46.
- [7] 张玉龙,石磊. 塑料品种与选用[M]. 北京:化学工业出版社,2012:48-50.
- [8] 崔立杰,孟春江. 汽车前端模块之发罩锁的安装设计[J]. 内燃机与配件,2021(5):29-30.
- [9] 王丹,徐俊芳,张艺伦,等. 电动汽车前端模块设计对冷却系统的影响[J]. 装备制造技术,2022(2):5-7.
- [10] 丁志勇,刘倩倩,万朝华,等. 汽车前端模块的设计[J]. 汽车零部件,2018(5):29-32.
- [6] 王开云,蔡成标,徐志胜. 基于频域方法的轨道随机振动特性及试验验证分析[J]. 机械工程学报. 2005,41(1):149-152.
- [7] 国家发展和改革委员会. 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第3部分:机械负荷:GB/T 28046.3—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011:1-36.
- [8] 黄培鑫,兰凤崇,陈吉清. 随机振动与冲击条件下电动车电机包结构响应分析[J]. 汽车工程,2017,39(9):1087-1093.
- [9] 赵久志,夏顺礼,刘涛,等. 基于 HyperWorks 的某动力电池总成壳体结构优化技术[J]. 汽车实用技术,2016(7):23-26.
- [10] 朱维兵,巫发茂,晏静江,等. 拓扑优化机载控制台的整机随机振动分析与试验[J]. 西华大学学报(自然科学版),2017,36(1):17-23.
- [11] 熊永华,杜发荣,高峰,等. 轻型载货汽车车架动态特性分析与研究[J]. 机械设计,2007,24(4):60-62.
- [12] 洪长满. 某机载雷达中钢丝绳隔振器的随机振动响应研究[J]. 电子机械工程,2011,27(3):8-11.
- [13] 刘昌儒,于鹏,贺帅,等. 印制电路板及元器件引脚振动分析[J]. 机电工程技术,2020,49(5):32-34.
- [14] 张义民. 机械振动[M]. 北京:清华大学出版社,2019:50-52.
- [15] 王涛,李宏玲. 基于有限元分析的客车振动试验研究[J]. 客车技术与研究 2013,35(5):46-50.

(上接第 39 页)