

# 电动汽车电机控制器随机振动仿真与试验\*

毛鸿锋<sup>1</sup>, 沈丁建<sup>1</sup>, 陈建明<sup>1</sup>, 李沁逸<sup>2</sup>, 卢钢<sup>1</sup>, 冯勤龙<sup>1</sup>

(1.中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 2.广安职业技术学院, 四川 广安 638000)

**摘要:** 为保证电动汽车电机控制器在行驶过程中的安全性, 对其进行随机振动分析。先利用仿真软件建立电机控制器有限元模型进行模态分析, 再进行模态试验, 并与仿真结果对比, 确保仿真模型的准确性; 然后对电机控制器仿真模型进行频响分析及随机振动疲劳寿命分析; 最后制作样机进行随机振动试验, 验证仿真分析结果的准确性和仿真方法的合理性。

**关键词:** 汽车; 电动汽车; 电机控制器; 随机振动; 频响分析; 疲劳寿命; 试验验证

中图分类号: U463.138

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)04-0001-04

随着能源和环境问题的日益突出, 新能源汽车得到飞速发展, 其市场占有率逐渐上升, 其安全性受到广泛关注。作为电动汽车核心“三电”部件之一的电机控制器, 其安全性是设计考量的重点。电动汽车的电驱动力总成不仅会在行驶过程中产生自振, 还会受到由路面不平顺产生的激振, 导致电机控制器因振动累积作用而产生疲劳损伤。一般的电机控制器开发流程是通过对试制样品进行随机振动、机械冲击等物理试验来校核控制器的结构安全性, 再针对不足之处进行优化改进, 不仅周期长, 成本高昂, 试验过程中还存在较大安全隐患。为缩减产品研发周期, 降低开发成本, 提高产品质量, 需在产品前期设计阶段运用有限元分析方法进行相关工况仿真分析, 预测产品性能, 并结合相关评价体系对产品进行结构优化改进。该文以随机振动试验的标准和理论为基础, 以某款电动汽车电机控制器为研究对象, 采用仿真模拟方法进行模态分析, 运用模态测试工具测得电机控制器实际模态, 对模态分析结果进行测试验证, 然后进行随机振动工况分析, 制作样机进行随机振动台架试验, 并与仿真结果进行对比, 验证仿真试验方法的准确性。

## 1 电机控制器结构

如图 1 所示, 电机控制器主要由驱动板组件、支撑电容、铜排、下箱体、IGBT 组件、上盖板、控制板组件、屏蔽板等构成, 其中下箱体与上盖板材料为 ADC12 压铸铝合金, 屏蔽板材料为 Q195。运用螺栓将电机控制器固定在整车安装支架上。

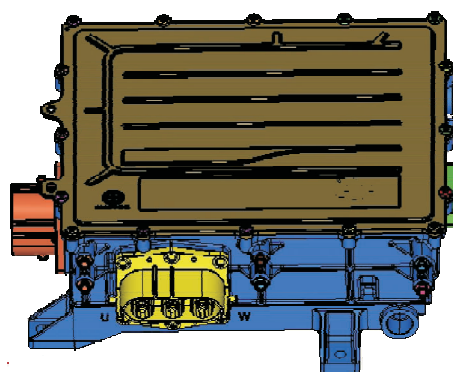


图 1 电机控制器模型

## 2 随机振动标准及工况解析

### 2.1 随机振动试验标准

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》中乘用车变速器的严酷度等级加载输入载荷谱, 单个方向的试验时间为 22 h, 加速度均方根值为  $96.6 \text{ m/s}^2$ 。表 1 为产品随机振动试验的功率谱密度值。

表 1 功率谱密度 PSD 与频率

频率/Hz	功率谱密度/ [ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ ]
10	10.00
100	10.00
300	0.51
500	5.00
2 000	5.00

对电机控制器进行实际安装状态下随机振动

\* 基金项目: 教育部科技发展中心高校产学研创新基金(2018A06035); 四川省教育厅课题(18ZB0258)

试验,之后对其进行仔细检查,应无紧固件松脱和零部件损坏现象,且通电状况下能满足基本性能要求。

## 2.2 随机振动工况解析

在相同道路及速度下进行道路试验,用车载测试仪测得电机控制器安装位置的加速度时间历程 $\ddot{X}_k(t)(1,2,\dots,n)$ 。因路面不平度的随机性影响,每次加速度时间历程均可看作一个样本数据。随机振动工况为所有样本数据的集合,记为 $\ddot{X}(t)$ 。 $\ddot{X}(t)$ 在 $t_1$ 和 $t_1+\tau$ 时刻构成两个随机变量 $\ddot{X}(t_1)$ 和 $\ddot{X}(t_1+\tau)$ ,对这两个随机变量的乘积进行集合平均,得到随机振动的自相关函数如下:

$$R_x(t_1, t_1+\tau) = E[\ddot{X}(t_1)\ddot{X}(t_1+\tau)] = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \ddot{X}_k(t_1)\ddot{X}_k(t_1+\tau) \quad (1)$$

相关函数表现的是随机振动过程在时差域内关于幅值的统计信息,而功率谱密度函数体现的是随机振动过程在频域内各频率点上对于幅值的统计信息。对自相关函数作傅里叶变换,得到自功率谱密度函数如下:

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

一般采用随机振动信号的加速度总均方根值评估随机振动工况的严酷度。运用功率谱密度计算方法求得加速度的总均方根值如下:

$$g_{rms} = \left( \int_{f_j}^{f_i} PSD(f) df \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: $f_i$ 、 $f_j$ 分别为随机振动频率的上下限。

## 3 模态分析与试验验证

### 3.1 模态分析

弹性物体的振动模态是其固有特性,通过模态分析可得到物体因各种激励源作用而产生的实际振动响应特征。因此,模态分析是产品开发设计的重要手段。

根据电机控制器的结构特点,对其内部电容、电路板、接插件、排线等部件作简化处理,通过质量单元平均分配到相应安装点上。表2为各主要部件的材料参数。模型共978 076个单元、263 236个节点,采用四面体单元,最小单元尺寸为1 mm。

通过仿真分析,求解电机控制器的固有模态频率,相应模态频率对应的结构振型见图2~4。

表2 电机控制器各部件材料参数

部件	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
箱体	70 000	0.330	$2.7 \times 10^3$
盖板	70 000	0.330	$2.7 \times 10^3$
屏蔽板	193 000	0.286	$7.93 \times 10^3$

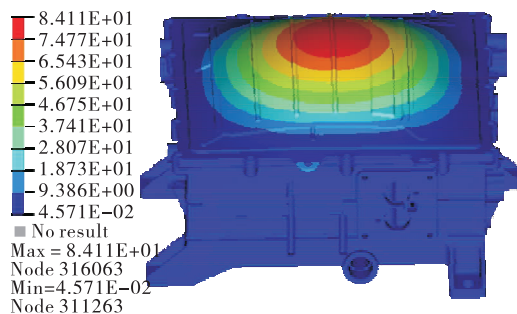


图2 电机控制器仿真第一阶模态(356 Hz)

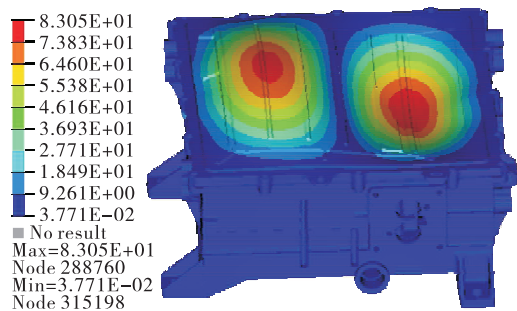


图3 电机控制器仿真第二阶模态(678 Hz)

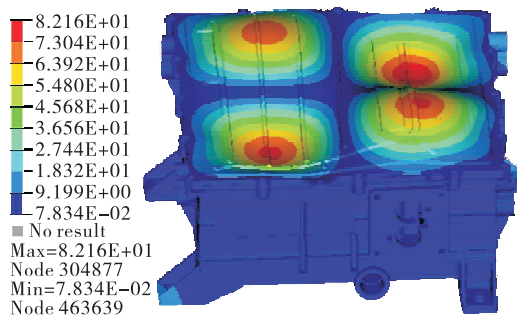


图4 电机控制器仿真第三阶模态(1 086 Hz)

### 3.2 模态试验及验证

采用单点激振、多点拾振的方法对样机进行模态测试,验证仿真模型的准确性。在模态测试前确认样机各部件连接紧密,按标准力矩紧固螺栓。若部件间存在间隙,会大大增加系统的非线性,影响测试结果的精度。模态测试共设置32个测点,频率分辨率设为1 Hz,测试频率为0~2 500 Hz。模态测试所得样机的部分固有模态频率见图5~7。

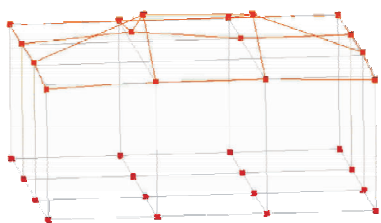


图 5 试验第一阶模态(343 Hz)

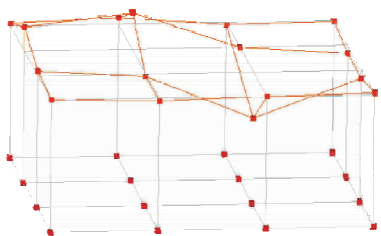


图 6 试验第二阶模态(665 Hz)

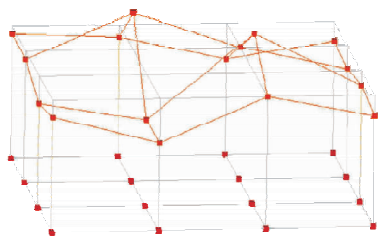


图 7 试验第三阶模态(1 068 Hz)

表 3 为模态仿真与试验结果对比。电机控制器模态误差在 5% 以内,且对应振型基本一致,说明有限元模型准确。

表 3 模态仿真与试验结果对比

阶次	频率/Hz		误差/%	振型
	仿真	试验		
1	356	343	3.8	上盖板局部伞形模态
2	678	665	2.0	上盖板局部 S 形模态
3	1 086	1 068	1.7	上盖板 2×2 S 形模态

## 4 仿真分析与试验验证

根据文献[6],电动汽车的振动响应及路面的随机输入基本符合正态分布。同时根据国家标准对随机振动试验的要求,输入的是只考虑线性振动载荷、满足正态分布的随机信号。因此,输出只是前后频域上带宽不同,但也满足正态分布的随机信号,可认为该输入的随机振动载荷对电机控制器作用输出的应力符合正态分布。

### 4.1 随机振动仿真

随机振动的仿真分析通常基于以下假设:1) 载荷与响应均满足正态分布;2) 载荷与响应均满足零

平均值假设。

随机振动分析通常以频率响应分析结果作为基础。在进行随机振动分析之前,需对仿真模型进行单位载荷的频率响应分析,得到模型的频率响应特性,然后将频率响应特性作为传递函数,对随机振动功率谱依式(4)对谱密度函数进行求解,求得模型随机振动工况响应,包括应变、位移、应力和加速度等。

$$S_r(f) = |H_f| \cdot S_i(f) \quad (4)$$

式中: $S_r(f)$ 为随机振动响应; $H_f$ 为单位频率响应; $S_i(f)$ 为功率谱密度函数。

在仿真软件中,按电机控制器的安装方式,先约束安装点的 6 个自由度,然后在安装点施加 Z 向频率响应载荷激励进行随机振动分析。通过仿真计算,得到最大应力均方根值为 84.04 MPa,远低于 ADC12 材料 230 MPa 的抗拉强度值下限。但仅以随机振动仿真结果无法评估产品是否能满足随机振动试验要求。

### 4.2 疲劳寿命分析

为评估电机控制器是否满足试验要求,在频响分析的基础上引入疲劳寿命评价方法。采用 Miner 线性累积损伤模型,运用 Goodman 方法进行修正,分析平均应力对疲劳寿命的影响。根据 Miner 线性累积损伤理论求得损伤  $D$ ,疲劳寿命即为损伤  $D$  的倒数。当损伤值大于 1 时,表示产品发生损坏。Miner 线性累积损伤理论表达式如下:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_{\sigma_i}} \quad (5)$$

式中: $D$ 为节点的累积损伤值; $\sigma_i$ 为节点的应力幅值; $n_i$ 为该节点发生 $\sigma_i$ 的频次; $N_{\sigma_i}$ 为该节点位置材料在等幅 $\sigma_i$ 作用下疲劳破坏的总次数。

将频响分析结果与振动试验载荷谱、各部件材料性能参数等导入疲劳分析软件,计算得出电机控制器的疲劳寿命见图 8。其最大损伤位置为螺孔处,损伤值为 0.673 7,控制器不会发生疲劳破坏。

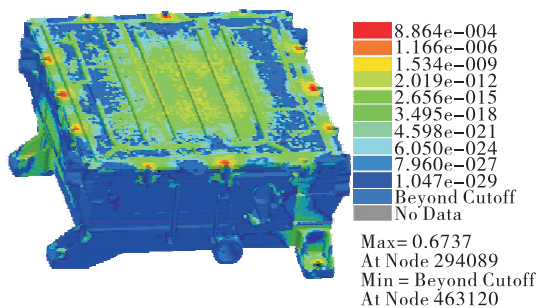


图 8 电机控制器疲劳损伤云图



### 4.3 随机振动试验验证

为验证电机控制器随机振动疲劳寿命仿真结果的准确性,对样机进行随机振动试验。随机振动试验基于 1.5 t 小型振动台,加载 GB/T 28046.3—2011 中乘用车变速器的严酷度等级输入载荷谱,输入频段为 10~2 000 Hz,进行垂向激励,试验持续时间 22 h。样机通过工装固定在振动台上,为防止振动传递放大失真,将振动台的振动信号控制点放在样机的安装脚旁边,保证振动输入满足标准要求。图 9 为样机随机振动试验现场。

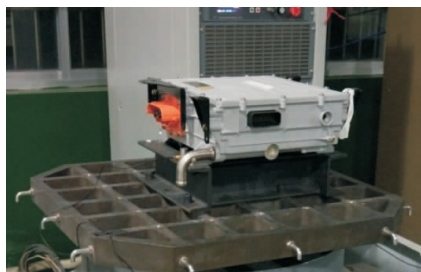


图 9 随机振动试验现场

仔细检查振动试验后的样机,并对其进行电性能复测,未发现明显异常,与仿真结果吻合,说明该电机控制器满足随机振动疲劳寿命要求。

## 5 结语

该文对电机控制器采用有限元仿真方法进行模态分析,并通过模态测试验证仿真模型的准确性;对模型进行频响及随机疲劳寿命分析,并通过随机振动试验与疲劳寿命仿真结果进行对比验证。通过整个仿真试验过程,得出一套随机振动工况下电动汽车电机控制器随机疲劳寿命分析方法,为电机控制

器的安全性研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] 薛玉春.电动汽车驱动和转向系统的振动与驱动电机的可靠性研究[D].长春:吉林大学,592007.
- [2] 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.
- [3] 庄表中,陈乃立.随机振动的理论及实例分析[M].北京:地震出版社,1985:216—222.
- [4] 丁杰,唐玉兔,忻力.基于结构仿真的振动夹具校核与疲劳寿命预估[J].兰州交通大学学报,2013,23(6):150—155.
- [5] 黄培鑫,兰凤崇,陈吉清.随机振动与冲击条件下电动车电池包结构响应分析[J].汽车工程,2017,39(9):1087—1099.
- [6] 檀润华,陈鹰,姚东方,等.路面随机激励下的汽车振动仿真[J].振动、测试与诊断,2000,20(2):45—48.
- [7] 孟强,郑松林,吴振.某汽车乘客安全气囊支架的随机振动强度分析与优化设计[J].机械设计与研究,2016,32(1):155—158.
- [8] 张志超,赵岩,林家浩.车桥耦合系统非平稳随机振动分析[J].振动工程学报,2007,20(5):439—446.
- [9] 冷晓伟,戴作强,郑莉莉,等.基于 nCodeDesignlife 的电池箱疲劳寿命研究[J].客车技术与研究,2018(3):17—19.
- [10] 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(5):46—50.
- [11] 沙云东,郭小鹏,张军.基于应力概率密度和功率谱密度法的随机声疲劳寿命预估方法研究[J].振动与冲击,2010,29(1):162—165.

收稿日期:2020—03—27

## 《公路与汽运》杂志 2021 年征订启事

《公路与汽运》杂志由长沙理工大学主办,是一份介绍汽车、道路、桥梁等公路交通领域科技信息的面向国内外公开发行的技术类科技期刊。国际标准刊号:ISSN 1671—2668,国内统一刊号:CN 43—1362/U。为首届(2006 年)中国高校特色科技期刊、湖南省一级期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊,被中国期刊全文数据库及中文科技期刊数据库全文收录、万方数据—数字化期刊群全文上网,并荣获首届《CAJ—CD 规范》执行优秀期刊奖。

本刊立足公路交通系统,报道国内外汽车与公路交通领域的最新研究成果,荟萃汽车运用与维修技术,传播公路交通安全知识,介绍公路运输行业的新技术与管理经验,刊登公路交通工程的新工艺、新技术、新材料。2021 年拟设主要栏目:汽车工程;交通规划与管理;运输与物流;道路工程;桥隧工程;工程经济与管理。

本刊为双月刊,逢单月 25 日出版。发行代号:国内 42—95,国外 DK43002。每期定价 15 元,全年 90 元。读者可在当地邮局订阅,也可直接向本刊编辑部索取订单订阅,订阅款请汇至本刊编辑部或银行账号。

通信地址:长沙理工大学金盆岭校区 8 号信箱

邮编:410076

联系电话:0731—83528400

开户行:长沙市农行高云支行

户名:长沙理工大学

账号:18—051401040000158