基于频率响应分析的 BCM 支架随机振动疲劳寿命预测

邓赛帮，刘向征，姜叶洁，钱银超
（广州汽车集团股份有限公司，广州 511434）

摘 要：针对某车型车身控制模块（BCM）支架的振动开裂问题，建立 BCM 支架有限元模型进行随机振动疲劳分析。分析结果与随机振动试验开裂位置吻合，验证了 BCM 支架随机振动分析的有效性。最后，对 BCM 支架进行了优化，效果良好。

关键词：车身控制模块；有限元模型；随机振动；结构优化
中图分类号：U463.83⁺4 **文献标志码**：A **文章编号**：1006-3331(2024)04-0039-05

Prediction of Random Vibration Fatigue Life of BCM Bracket Based on Frequency Response Analysis

DENG Saibang, LIU Xiangzheng, JIANG Yejie, QIAN Yinchao
(Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China)

Abstract: Aiming at the vibration cracking problem of a vehicle BCM bracket, a finite element model of the BCM bracket is established to do the random vibration fatigue analysis. The analysis results are consistent with the cracking position of the random vibration test, which verifies the effectiveness of the BCM bracket's random vibration fatigue analysis. Lastly, the structure of the BCM bracket is optimized, which effect is good.

Key words: body control module; finite element model; random vibration; structure optimization

随着汽车智能网联技术的不断发展，车身控制模块（BCM）已成为重要的功能部件，其支架疲劳耐久性能至关重要。BCM 在汽车行驶过程中受到外界振动、冲击等随机载荷的激励，工况极其复杂。因此有必要对 BCM 支架进行随机载荷疲劳分析，预测支架疲劳寿命及薄弱位置，以提高产品的市场竞争力。

本文以某车型 BCM 支架为研究对象，针对其随机振动试验开裂现象进行随机振动疲劳分析。仿真结果显示 BCM 支架螺栓孔安装区域不满足疲劳耐久要求，这与随机振动试验结果基本吻合，然后对 BCM 支架进行结构改进，改进后的结构满足随机振动试验要求。

1 随机振动疲劳分析流程

随机振动疲劳分析是基于系统频率响应特性进行求解的，获取频率响应特性有直接法和模态法两种数值方法[1-2]。为得到 BCM 支架的模态振型，使仿真模拟更加高效，本文采用模态法进行求解。

采用模态法进行 BCM 支架的随机振动疲劳分析共有两大步骤，首先对 BCM 支架进行模态响应分析，得到结构应力与输入频率之间的传递函数[3-4]；然后再结合功率谱密度及材料 S-N 曲线进行疲劳寿命预测[5]。随机振动疲劳分析流程如图 1 所示。

收稿日期：2024-01-04。
基金项目：广东省重点领域研发计划项目（2019B090911003）。
第一作者：邓赛帮（1991—），男，硕士；工程师；主要从事汽车车身结构优化与疲劳仿真分析工作。E-mail：dengsaibang@gacrnd.com。

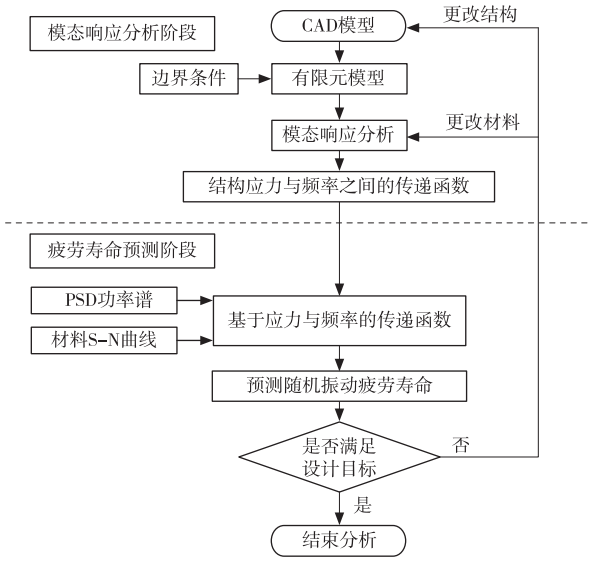


图 1 随机振动疲劳分析流程

2 BCM 支架随机振动疲劳寿命仿真

某车型 BCM 支架如图 2 所示。BCM 通过 A、B、C、D 四个螺钉连接在 BCM 支架上;BCM 支架又通过 S1、S2 两个螺栓连接在仪表板横梁(CCB)上。其中 BCM 质量为 0.5 kg,BCM 支架料厚度为 1.5 mm,材料型号为 DC01 钢材,断裂极限为 409 MPa。

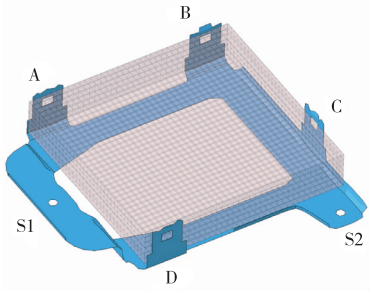


图 2 BCM 支架结构图

2.1 BCM 支架频率响应分析

频率响应分析是求结构应力特征与输入频率之间的关系,频率响应是结构的固有属性,与结构所受载荷无关[6]。采用 MSC. Nastran 软件进行频率响应分析:按照实际情况对 BCM 支架进行约束,并在 S1、S2 两个螺栓孔处沿整车 X(前后)、Y(左右)、Z(上下)三个方向分别施加 0~1 000 Hz 的单位加速度(g)激励,得到 BCM 支架在整车 X、Y、Z 三个方向的应力响应函数(X 激励对应 X 响应,Y 激励对应 Y 响应,Z 激励对应 Z 响应),如图 3 所示。

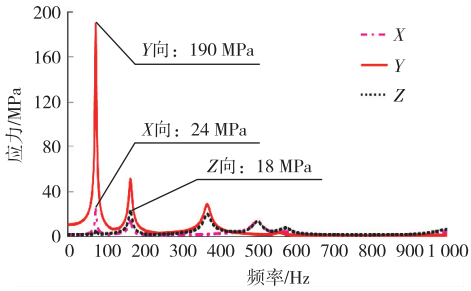
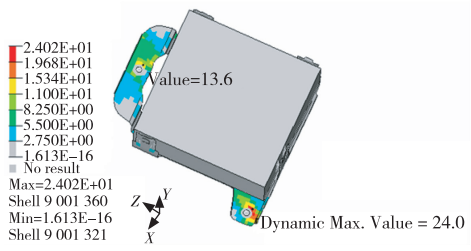
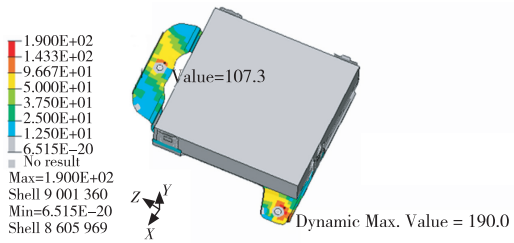


图 3 BCM 支架最大应力位置频率响应

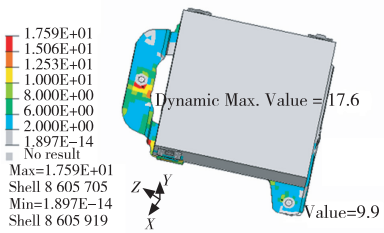
从图 3 可知,BCM 支架分别在 X、Y 向激励下,在频率为 74.1 Hz 处出现最大应力;在 Z 向激励下,在频率为 165.1 Hz 处出现最大应力。BCM 支架分别在 X、Y、Z 三个方向激励下,对应各方向的应力分布云图如图 4 所示。



(a) X 向 74.1 Hz 的频率响应



(b) Y 向 74.1 Hz 的频率响应



(c) Z 向 165.1 Hz 的频率响应

图 4 BCM 支架频率响应应力分布图

从图 4 可知,BCM 支架在 X、Y、Z 三向的最大应力均出现在螺栓孔安装区域,与随机振动试验开裂的位置基本一致。其中,在 X 向激励下,螺栓约束孔 S2 在频率 74.1 Hz 处出现 X 向最大应力,最大应力为 24

MPa；在 Y 向激励下，螺栓约束孔 S2 在频率 74.1 Hz 处出现 Y 向最大应力，最大应力为 190 MPa；在 Z 向激励下，螺栓约束孔 S1 在频率 165.1 Hz 处出现 Z 向最大应力，最大应力为 17.6 MPa。

2.2　BCM 支架随机振动疲劳强度分析

电子电器类产品的随机振动试验一般参照 GB/T 2423.56—2006[7]、IEC 60068-2-64:2008[8]，标准主要规范了随机振动的边界条件及试验方法。BCM 支架随机振动试验的扫描频率范围为 10~1 000 Hz，三个振动方向 X、Y、Z 的振动时间为各 8 h，载荷加载位置为 BCM 支架的螺栓安装孔[9-10]。随机振动功率谱密度如图 5 所示。为留有安全余量，本车型 BCM 支架随机振动功率谱密度选择等级 1。

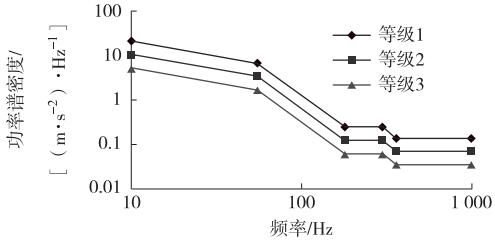
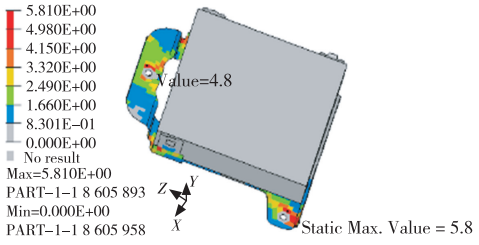
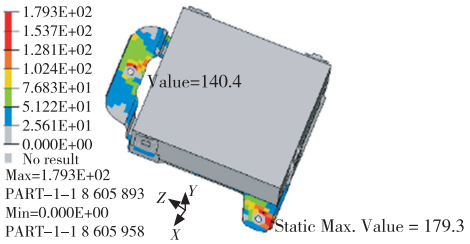


图 5　随机振动功率谱密度

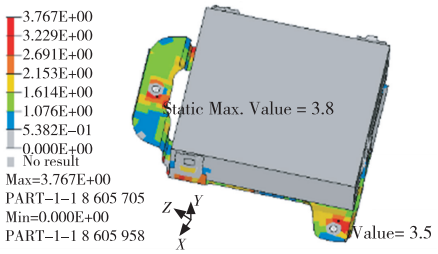
基于前述 BCM 支架频率响应分析结果，再结合上述功率谱密度在 ABAQUS 软件中进行随机振动疲劳强度求解计算，得到 BCM 支架分别在 X、Y、Z 三个方向的 RMISES 应力分布，如图 6 所示。



(a) X 向随机振动



(b) Y 向随机振动



(c) Z 向随机振动

图 6　BCM 支架随机振动应力分布图

目前，工程中广泛应用的随机振动疲劳强度计算方法是 Steinberg 提出的高斯 3σ 应力判定准则[11]。在随机振动中，以第一主应力 1σ 为正态分布的标准差，根据标准正态分布准则，则在应力区间 $(-1\sigma, 1\sigma)$、$(-2\sigma, 2\sigma)$、$(-3\sigma, 3\sigma)$ 的系统振动时间分别占总时间的 68.3%、27.1% 和 4.33%，即应力区间大于 3σ 的振动时间只占总时间的 0.27%，不会对系统结构造成损伤。由高斯 3σ 应力判定准则可知，当 $3\sigma \geq \sigma_s$（屈服极限）时，结构会发生疲劳破坏。由图 6 可知，BCM 支架在 Y 向功率谱激励下，3 倍 RMISES 应力为 $3\times179.3=537.9$ MPa $\geq \sigma_s=409$ MPa，因此 BCM 支架在 Y 向功率谱激励下会发生疲劳破坏。

通过随机振动疲劳强度分析，虽然能判断结构是否会发生疲劳破坏，但无法直观地得知 BCM 支架在随机振动试验中所能承受的振动时间，不利于结构的优化设计，因此有必要进行随机振动疲劳寿命预测。

2.3　BCM 支架随机振动疲劳寿命预测

随机振动疲劳寿命预测是基于 Miner 累积损伤理论[12]，将频率响应分析结果导入 Ncode 软件中，结合材料 S-N 曲线及功率谱密度曲线进行计算获得。由 Ncode 软件计算得出 BCM 支架分别在 X、Y、Z 三向进行 2.2 中的功率谱密度循环作用的疲劳寿命，疲劳寿命云图如图 7 所示。

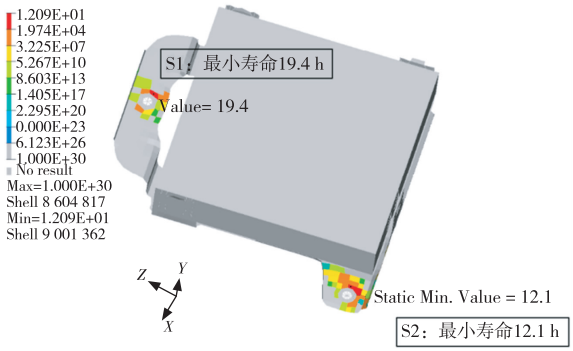


图 7　BCM 支架随机振动疲劳寿命云图

由图 7 可以看出,BCM 支架螺栓安装孔在 X、Y、Z 三向功率谱密度循环作用下的疲劳寿命如下:螺栓安装孔 S1 处为 19.4 h;螺栓安装孔 S2 处为 12.1 h。其中 S2 处的寿命为 BCM 支架的最小寿命,即为 BCM 支架最薄弱区域。而按照 BCM 支架随机振动试验标准,振动时间为 X、Y、Z 三向各 8 h,即循环时间为 24 h。因此 BCM 支架在随机振动试验中必然会发生疲劳破坏,这与上述 BCM 支架随机振动疲劳强度计算结果吻合。

2.4 BCM 支架随机振动试验验证

通过对 BCM 支架进行随机振动疲劳强度分析和随机振动疲劳寿命分析,可发现 BCM 支架螺栓孔安装区域不满足随机振动耐久要求。随机振动疲劳强度计算只能评估是否合格,而随机振动疲劳寿命分析能够计算出振动时间,可较为直观地与随机振动试验对标验证。

BCM 支架随机振动试验在 LDS-dactron 振动测试系统上进行。该测试系统主要由振动台、传感器、加载装置以及冷风机等设备组成[13]。将 BCM 支架通过两个螺栓安装孔固定在振动台架上,同时在螺栓固定位置施加与 2.2 节、2.3 节相同的随机载荷,即随机载荷以 PSD 功率谱的形式输入,扫描频率范围为 10~1 000 Hz,扫描速率为 1 倍频/min,振动时间为 X、Y、Z 三个方向各 8 h,三向循环共计 24 h。台架试验现场如图 8 所示。

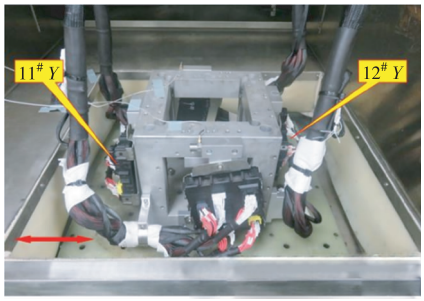


图 8 随机振动试验台架

某车型 BCM 支架随机振动台架试验进行至 11.5 h 时,安装孔 S2 处开始产生裂纹;进行至 18 h 时,螺栓安装孔出现断裂脱落现象,试验被迫终止。试验后的 BCM 支架安装孔 S2 断裂脱落,安装孔 S1 已出现裂纹,如图 9 所示。试验结果与 BCM 支架随机振动疲劳寿命预测基本一致。

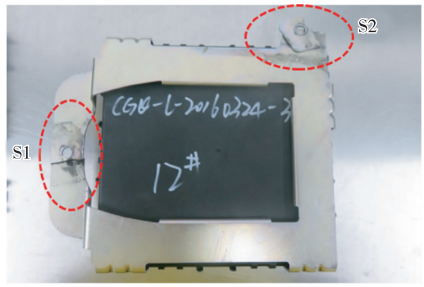


图 9 BCM 支架开裂

3 BCM 支架结构改进

该 BCM 支架结构的改进无法通过增加材料的厚度及材料的性能等级来实现。考虑到原 BCM 支架安装方式稳定性不够,改进时只调整 BCM 支架安装孔 S1、S2 的位置,其他不改变。分析改进前的应力云图状态,确定 S1、S2 的调整位置(如图 10 所示)。

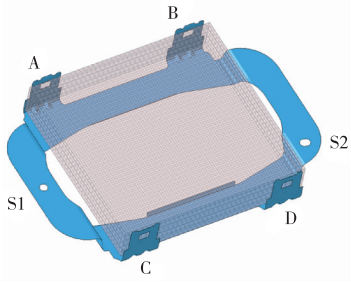
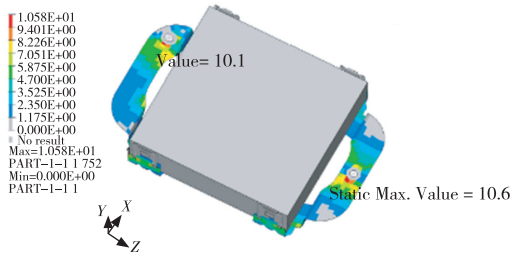
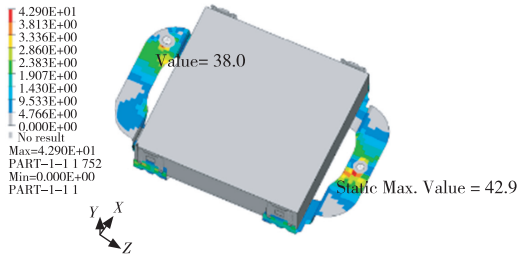


图 10 优化后的 BCM 支架

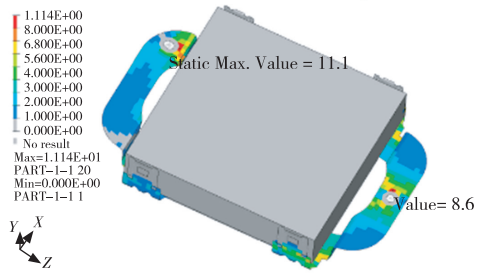
同样对改进后的 BCM 支架进行输入的随机振动疲劳强度分析,在 X、Y、Z 三个方向功率谱作用下的应力云图如图 11 所示。结果显示在 Y 向功率谱激励下,BCM 支架 Y 向的最大 RMISES 应力发生在螺栓安装孔 S1 处,其值为 42.9 MPa。根据高斯 3σ 应力判定准则,3 倍 RMISES 应力 $3\sigma_y = 128.7\ \text{MPa} \leqslant \sigma_s$,因此改进后的 BCM 支架满足随机振动试验要求。



(a) X 向随机振动



（b）*Y* 向随机振动



（c）*Z* 向随机振动

图 11　改进后 BCM 支架随机振动应力分布图

为得到改进后的 BCM 支架能承受的振动时间，同样对支架进行输入的随机振动疲劳寿命分析。结果显示，在 *X*、*Y*、*Z* 三个方向循环作用下的振动时间为 33.4 h，最小疲劳寿命发生在螺栓安装孔 S1 处，满足随机振动试验要求，疲劳寿命云图如图 12 所示。改进后的 BCM 支架顺利通过了随机振动台架试验，试验进行至三个方向循环完结的 24 h 时自动终止。该 BCM 支架已应用于某上市车型。

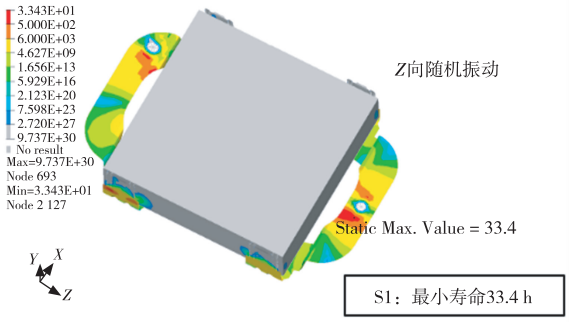


图 12　BCM 支架随机振动疲劳寿命云图

4　结束语

基于频率响应分析结果，结合 PSD 功率谱及材料 S-N 曲线，对某车型 BCM 支架进行随机振动疲劳强度分析和疲劳寿命预测，可得出以下结论：

1）随机振动疲劳强度分析和随机振动疲劳寿命预测都能评判 BCM 支架是否满足随机振动试验要求，指导结构优化设计。

2）随机振动疲劳强度是以 3 倍 RMISES 应力为评判准则，无法直观地得知随机振动能承受的振动时间，不利于结构的轻量化及试验对标。

3）随机振动疲劳寿命分析能准确预测 BCM 支架在随机振动试验中能承受的振动时间，能更有效地指导设计优化及轻量化。

参考文献：

[1] 王世阳，陈闯，汪海洪. 电动客车直驱永磁同步电机随机振动试验与仿真[J]. 客车与技术研究，2023，45(6)：37-39.

[2] 王二化，许志荣，叶锋. 立式铣床刀尖频响函数预测方法研究[J]. 机床与液压，2017，45(11)：138-142.

[3] 李源源. 基于频率响应分析的车架疲劳寿命预测研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2011.

[4] LI S R. A methodology for fatigue prediction of electronic components under random vibration load[J]. Journal of Electronic Packaging，2001，123(4)：394-400.

[5] 杨松平，王志伟. 运输包装随机振动的加速度响应谱分析[J]. 振动与冲击，2023，42(16)：37-46.

[6] 潘鹏，刘杰，董帅，等. 车辆频率响应特性分析及试验评价指标研究[J]. 汽车科技，2023(6)：6-10.

[7] 中国电工协会. 电工电子产品环境试验 第 2 部分-试验方法 试验 Fh：宽带随机振动和导则：GB/T 2423. 56—2006[S]. 北京：中国标准出版社，2006：1-30.

[8] International Electrotechnical Commission. Environmental testing - Part 2-64：Tests - Test Fh：Vibration，broadband random and guidance：edition 2：IEC 60068-2-64：2008[S]. Geneva：International Electrotechnical Commission，2008：1-76.

[9] 李敏浩，邓赛帮，刘向征，等. 车身控制模块支架的随机振动有限元疲劳分析及优化[J]. 现代制造工程，2018(6)：64-68.

[10] 张宪，何洋，钟江，等. 疲劳振动试验台的模态与谐响应分析[J]. 机械设计与制造，2008(4)：12-14.

[11] 李杰，秦玉英，赵旗，等. 虚拟激励法及其在汽车随机振动应用中的探讨[J]. 汽车技术，2007(7)：24-27.

[12] 周传月，郑红霞，罗慧强，等. MSC. Fatigue 疲劳分析应用与实例[M]. 北京：科学出版社，2005：32-48.

[13] 邹艳，吴清文，董得义，等. 空间相机支杆组件的随机振动分析与试验研究[J]. 系统仿真学报，2009，21(16)：5009-5012.