

汽车前保支架台架疲劳试验关联研究

田应东，李衡，苏振兴
东风汽车集团有限公司技术中心

【摘要】A 车型首次搭载金属前保险杠，基于 A 车型在整车路试中出现金属前保险杠支架断裂、螺栓附近出现裂纹等问题，结合路试工况、环境、使用情况等多种因素进行分析，将整车路况转换、迭代成台架振动路谱；根据整车道路试验路谱，建立每一个工况下的载荷的疲劳损伤计算模型，在该疲劳损伤的基础上转换模型，建立了考虑每一个工况下的载荷累积损伤模型。同时，将各个工况下的疲劳损伤累积视为随机增量过程，求得结构可靠性随耐久里程的总体变化规律，该方案提出的可靠性计算方法可以得到与工程经验相符合的结构疲劳耐久可靠性结果；根据分析计算得到的台架谱进行有限元分析和台架振动试验验证，使得整车出现的问题在 CAE 和台架上进行复现，进行了可靠、综合、全面的验证，为问题的排查奠定了基础，也为问题的解决方案提供了理论及试验支撑，改进过程中进行多轮仿真优化，最终通过测试验收，改进效果非常明显，同时节省了试验样车、试验周期、试验成本与改进时间。

【关键词】 金属前保险杠，断裂，路谱迭代，台架振动

Research on the Correlation of Fatigue Test of Automobile Front Support Bracket Bench

Tian Yingdong, Li Heng, Su Zhenxing

Dongfeng Motor Company Technology Center

Abstract: Model A is equipped with a metal front bumper for the first time, based on the problems of metal front bumper bracket fracture and cracks near bolts in the road test of model A, combined with the analysis of various factors such as road test conditions, environment, and usage, the road conditions of the whole vehicle are converted and iterated into a bench vibration spectrum. According to the vehicle road test spectrum, the fatigue damage calculation model of the load under each working condition is established, and the cumulative damage model of the load considering each working condition is established on the basis of the fatigue damage conversion model. At the same time, the accumulation of fatigue damage under various working conditions is regarded as a random incremental process, and the overall variation law of structural reliability with endurance mileage is obtained, and the reliability calculation method proposed in this scheme can obtain structural fatigue durability reliability results consistent with engineering experience. According to the bench spectrum obtained by analysis and calculation, finite element analysis and bench vibration test verification are carried out, so that the problems of the whole vehicle are reproduced on CAE and the bench, and reliable, comprehensive and comprehensive verification is carried out, which lays the foundation for the troubleshooting of the problem, and also provides theoretical and experimental support for the solution of the problem, and carries out multiple rounds of simulation optimization in the improvement process, and finally passes the test acceptance, the improvement effect is very good, and at the same time saves the test prototype, test cycle, test cost cost and improvement time.

Key words: metal front bumper, break, path spectrum iteration, bench vibration

引言

本文基于道路谱转化迭代形成台架试验谱谱，找到了金属前保险杠开裂问题原因并做出了较为完善的解决方案。A 车型首次搭载金属前保险杠，该金属前保险杠通过支架和螺栓与前纵梁相连接，由于连接部位都为刚性连接，且重量较大，相较于传统的塑料前保险杠，金属前保在道路试验时会受到更大的载荷与冲击，A 车型经过 12000km 道路试验后，出现前保险杠支架断裂（见图 1）及螺栓附近的钣金开裂问题（见图 2），该问题对于整车品质有着重要影响，需要尽快找到问题原因并找到最优方案解决该问题，为快速分析问题原因，需要制定一套既方便又便捷的验证方式，因在整车上不便于观察问题，因此最终决定通过有限元分析和在台架上验证该问题。



图 1 支架断裂

1 问题解析

1.1 金属前保险杠转动惯量大

金属前保险杠重量较传统塑料前保险杠大，在道路试验



图 2 钣金开裂

过程中所受到的转动惯量较大，支架收到不断的 Z 向惯量力冲击，导致疲劳断裂。

1.2 连接处无缓冲结构

金属前保险杠整体刚性较大，且与前纵梁采用刚性连接，导致内应力无法得到有效的缓冲，最后全部集中于强度较弱的支架部分，引发支架变形、断裂。

1.3 悬臂过长

金属前保险杠左右两侧悬臂过长，无法通过薄弱的支架进行有效的固定，当路面状态太差时，金属前保险杠左右两侧悬臂会在 Z 向上下摆动，引发支架疲劳断裂。

1.4 损伤累加

当金属前保险杠左右支架疲劳断裂后，损伤进一步加剧，当路面状态太差时，金属前保险杠左右两侧悬臂在 Z 向上下摆动的幅度及加速度变得更大，导致与纵梁连接处的螺栓附件的钣金受到更多的冲击及载荷，当损伤积累到一定程度就会引起该处钣金变形、开裂。

1.5 冲孔位置影响

与纵梁连接处的螺栓附件的钣金附近有一个方孔，方孔影响了该处的刚度，使得方孔边角处钣金强度降低，容易出现开裂。

2 路谱迭代

2.1 载荷应力计算

工程学常用线性损伤累积法则（Miner 法则）计算疲劳损伤累积过程，对于多层次加载，累积损伤可由式（1）计算得到：

$$D = \sum_{i=1}^M \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

式中， n_i 为第 i 级载荷加载水平下的实际发生的动应力循环次数； N_i 为第 i 级加载水平下的材料的疲劳寿命； M 为加载水平总级数^[1]。

工程学常用 S-N 曲线描述材料疲劳耐久强度与载荷水平之间的关系，曲线的疲劳寿命一般表示该载荷下寿命分布的均值，一般也代表中值 S-N 曲线，数学模型表征如下：

$$S_a^m N = C \quad (2)$$

其中， m 、 C 表示与材料本身属性相关的常数，一般由试验数据拟合得到。常数是两个常数，与材料的性质、样件的形式和载荷加载方式等有关，可由试验数据确定。

联立式（1）、式（2），得到单次加载下的损伤水平，及单位损伤，计算公式如下：

$$D_i = \frac{1}{N_i} = \frac{S_i^m}{C} \quad (3)$$

由于载荷是随机的，因此动态应力也是随机的，所以可将单位损伤 D_i 视为一个随机变量，其分布特征就由应力水平 S 决定。

整车道路耐久试验过程中，承受的载荷随着工况的变化而不同，是一个比较大的范围，需要把每个工况单独定义，假定每一个工况都相对平稳，采用威布尔分布将每个工况应力的幅值分布进行单独拟合，可得到幅值分布直方图，再使用估算方法求得单位损伤的统计量。

结构动应力 S_i 经雨流计数后，其得到的幅值分布服从威布尔分布，其高阶原点矩计算公式如下：

$$E(S^k) = a^k \Gamma\left(1 + \frac{k}{b}\right) \quad (4)$$

其中， a 为尺度参数； b 为形状参数。

其中 D_i 也为一随机变量，根据式（4）可得到其统计量：

$$E(D_i) = \frac{a^m}{C} \Gamma\left(1 + \frac{m}{b}\right) \quad (5)$$

$$D(D_i) = \frac{a^{2m}}{C^2} \Gamma\left(1 + \frac{2m}{b}\right) - E^2(D_i) \quad (6)$$

式（5）、式（6）可表征具有随机统计特征的结构单位损伤的期望及方差^[2]。

单位损伤分布与施加载荷高度相关，上述推导过程从随机性的方面说明，并从统计学的角度说明了各统计量计算方法。

上述说明在不同载荷条件下的单位损伤服从独立正态分布，各工况条件下，由雨流计数得到的循环次数 n 为参数描述各个强化工况， $\{D(n); n=1, 2, 3, \dots, n_i\}$ ，由极限定理，当 n 满足样本足够大的条件时，各载荷水平下的损伤非常逼近正态分布，其期望方差计算公式如下：

$$\mu[D(n)] = E(\sum D_i) = nE(D_i) \quad (7)$$

$$\sigma^2[D(n)] = D(\sum D_i) = nD(D_i) \quad (8)$$

2.2 应力谱计算

应力谱幅值分布需要经威布尔分布进行拟合，两参数威布尔分布式如下：

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right] \quad (9)$$

概率密度函数计算公式如下：

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right] \quad (10)$$

其中， a 为尺度参数， b 为形状参数。

使用最小均方根误差作为目标函数，使用粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）对分布参数进行求解。

均方误差计算公式如下：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F_w(x_i) - F(x_i)]^2} \quad (11)$$

其中， $F_w(X_i)$ 表示幅值分布服从威布尔分布的总计分布频率； $F(X_i)$ 表示根据实测数据的雨流计数，从而得到的实际累积频率^[3]。当 RMSE 值寻得最小值时，便表示分布拟合得到最优解。

2.3 载荷损伤校准

本文采用 Morrow 提出的多级载荷损伤转换模型，从而来得到等效累计损伤期望的计算方法。在样件承受多级载荷条件下，每一级载荷所产生的损伤计算公式如下：

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \left(\frac{\bar{\sigma}_i}{\bar{\sigma}_m} \right)^d \quad (12)$$

其中， σ_m 表示最大幅度值； d 表示应力随时间变化的参数，一般取 0.2。

结构收到第一级载荷循环的次数为 n_1 ，其产生的损伤值 D_1 为 $\frac{n_1}{N_1}$ ，该载荷等效于第二级载荷已经作用 n_{12} 次，其

产生的损伤 D_{12} 为 $\frac{n_{12}}{N_2}$ ，如图 3 所示，图中 A、B 属于同一 S-N 曲线，表示所产生的损伤一致。

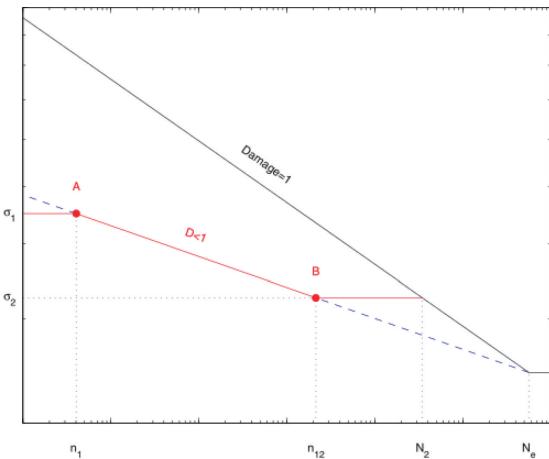


图 3 σ_1 到 σ_2 等损伤传递示意图

联立式 (10)，二级载荷作用下的损伤转换公式如下：

$$\frac{n_1}{N_1} \left(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_m} \right)^d = \frac{n_{12}}{N_2} \left(\frac{\bar{\sigma}_2}{\bar{\sigma}_m} \right)^d \quad (13)$$

二级载荷作用下的循环次数数转换公式为

$$n_{12} = n_1 \left(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_2} \right)^{m+d} \quad (14)$$

其中 $\left(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_2} \right)^{m+d}$ 表示不同载荷的相互作用。相应地，对于包含 i 级应力水平的疲劳载荷过程，可将前 $i-2$ 级加载过程进行等效转换，等效为第 $i-1$ 级载荷单独作用的效果，再根据第 i 级载荷进行等效转换，可以等效成为第 i 级载荷单独作用的恒幅加载过程。

$$n_{i-1,i} = n_{i-1} + \left[n_{i-2} + \cdots + \left(n_1 \left(\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_2} \right)^{m+d} \left(\frac{\bar{\sigma}_2}{\bar{\sigma}_3} \right)^{m+d} \cdots \left(\frac{\bar{\sigma}_{i-2}}{\bar{\sigma}_{i-1}} \right)^{m+d} \right) \left(\frac{\bar{\sigma}_{i-1}}{\bar{\sigma}_i} \right)^{m+d} \right] \right] \quad (15)$$

根据上述转换公式，可以将道路上的复杂的各工况的道路谱转换成一个相对合理的台架谱，其累计损伤与整车基本保持一致，得到了较好的还原，累积损伤的期望和方差计算公式可参考式 (7)、式 (8)。根据台架谱进行有限元分析，很好地复现了金属前保支架断裂、钣金开裂问题，还需要在台架上再次验证。

3 台架验证

3.1 台架搭建

使用刚性工装模拟前纵梁，将其固定在振动台上，前纵梁与前保险杠的连接方式保持与实车完全一致，前保险杠安装位置及方向也与实车一致，螺栓扭矩、周边环境件都按照实车匹配。

3.2 传感器布置

根据 A 车辆道路试验中布置的加速度传感器位置，将其位置同步到前纵梁工装上，分别在左右前纵梁上相应位置布置加速度传感器（见图 4、图 5）。传感器的位置和方向将会与道路试验的完全保持一致，这样可以最大限度的还原整车的真实路况，有利于试验的完整性和真实性，对于试验结果的准确性有着积极作用。



图 4 传感器布置



图 5 传感器布置

3.3 路谱迭代输入

在前纵梁上布置三向加速度传感器，采集道路谱（见

图 6), 分别采集到在各个路况上的加速度谱, 将其过滤掉不合理的数据, 整合成完整的道路谱。

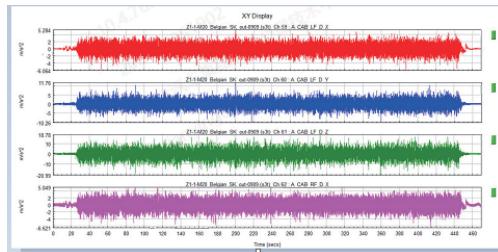


图 6 道路谱

根据整车路谱迭代, 将其道路工况模拟到台架上建立相应台架谱表(见表 1); 分别进行 X 向、Y 向、Z 向的台架振动试验, 将台架谱表拟合成台架谱, 分别为 X 向台架谱(见图 7)、Y 向台架谱(见图 8)、Z 向台架谱(见图 9)。

表 1 台架谱表

	X		Y		Z	
Hz	Hz	(g^2/Hz)	Hz	(g^2/Hz)	Hz	(g^2/Hz)
5	5	2.44E-04	5	4.43E-04	5	4.57E-03
8	8	2.29E-02	8	8.97E-02	8	2.50E-01
10	10	6.50E-04	12	1.85E-02	12	2.05E-01
12	12	3.90E-03	15	1.54E-03	15	3.53E-03
14	14	1.55E-03	18	1.53E-01	18	9.62E-01
18	18	2.24E-01	22	4.60E-03	22	7.55E-03
22	22	1.50E-03	26	3.70E-01	26	1.37E+00
26	26	4.63E-02	32	1.31E-03	32	6.57E-03
30	30	1.40E-03	35	2.85E-02	35	1.52E-01
35	35	1.39E-02	41	1.82E-03	41	3.07E-03
41	41	2.59E-04	52	1.55E-03	46	2.15E-03
48	48	2.82E-04	68	1.07E-05	51	4.69E-02
51	51	4.74E-03	2000	1.57E-05	71	2.51E-04
68	68	2.72E-05			2000	2.31E-04
200	2000	2.52E-05				
RMS	RMS=0.7920924376 g		RMS=1.066531061 g		RMS=2.484090507 g	
	Time = 16 h ^a		Time = 16 h		Time = 16 h	

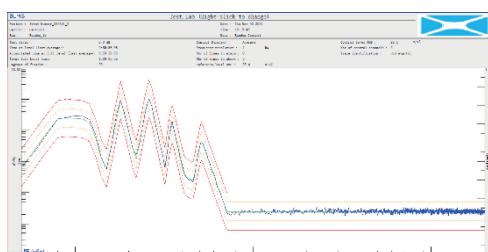


图 7 X 向台架谱

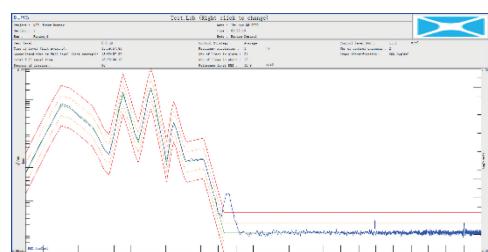


图 8 Y 向台架谱

3.4 试验结果

金属前保问题复现台架试验, 在经历台架载荷谱验证

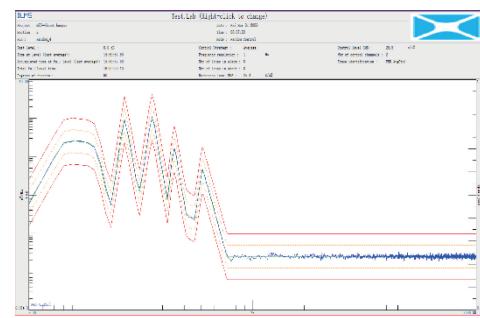


图 9 Z 向台架谱

(X、Y、Z 方向), 出现连接支架断裂(见图 10)、前保险杠产生裂纹(见图 11)的问题。



图 10 支架断裂



图 11 钣金开裂

3.5 改善方案及验证

经过台架验证, 其试验结果与道路试验结果基本保持一致, 支架在振动中断裂, 随后导致金属前保险杠在 Z 向振动幅度变大, 载荷变大, 导致钣金也出现撕裂。

根据 CAE 分析得到金属前保险杠的薄弱点, 对其结构和材料进行了加强, 经过多轮结构改善及有限元分析, 最终得到了一个较为合理的改善方案。方案具体为: 增加支架强度, 增加料厚(见图 12), 更改材料, 增加模态, 在支架和前照灯固定支架之间增加一个几字形支架(见图 13), 这些改善方案大大增加了金属前保的整体模态, 使其可以承受更大的载荷。

根据改进的方案, 重新制作样件再次台架试验验证, 试验结果合格, 与 CAE 分析结果基本保持一致, 支架未发生断裂, 钣金未撕裂(见图 14)。后续按照金属前保改进方案生产样件装车, 路试结果满足要求, 与 CAE 及台架验证结

果吻合。



图 12 增加料厚

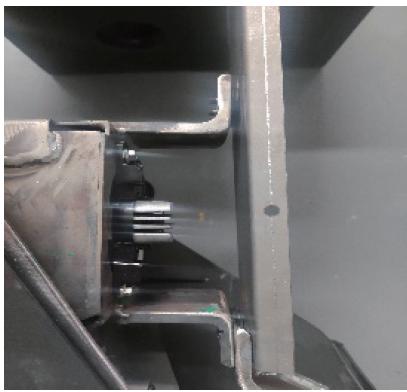


图 13 增强结构



图 14 试验后钣金未开裂

4 结论

针对 A 车型在整车路试中出现金属前保险杠支架断裂、螺栓附近出现裂纹等问题，本文结合路试工况、环境、使用情况等多种因素进行分析，将整车路况转换、迭代成台架振动路谱；根据整车道路试验路谱，建立各工况载荷的随机疲劳损伤可靠性计算模型，该计算模型可以将整车道路谱转换成一个较为合理、全面的台架谱，根据分析计算得到的台架谱进行有限元分析和台架振动试验验证，使得整车出现的问题在 CAE 和台架上进行复现，进行了可靠、综合、全面的验证，为问题的排查奠定了基础，也为问题的解决方案提供了理论及试验支撑，改进过程中进行多轮仿真优化，最终通过测试验收，改进效果非常明显，同时节省了试验样车、试验周期、试验成本与改进时间。后续车型再次搭载相似结构，可以参考使用该模型及台架谱，为项目的开发和验证节省时间及成本，有利于该领域的发展和进步。

参 考 文 献

- [1] 谢里阳, 任俊刚, 吴宁祥, 等. 复杂结构部件概率疲劳寿命预测方法与模型 [J]. 航空学报, 2015, 36 (8): 2688-2695.
- [2] REGE K, PAVLOU. G D. A one-parameter nonlinear fatigue damage accumulation model [J]. Int J Fatigue, 2017, 98 (5): 234-246.
- [3] FATEMI A, YANG LI. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials [J]. Int J Fatigue, 1998, 20: 9-34.