

# 一种基于载荷谱的频域通用振动谱确定方法探究

贺娜，李鹏，张磊，任斌，田朋涛  
陕西重型汽车有限公司

**【摘要】**为减少道路载荷谱采集种类，降低载荷谱采集费用，提高振动谱通用性，本文提出一种基于道路载荷谱的频域加速通用振动谱确定方法。文中以空气处理单元支架为研究对象，通过研究对象选取、载荷谱提取、振动谱计算及拟合、验证试验设计、通用振动谱修订等对通用振动谱确定方法进行说明，通过对比分析验证试验结果与售后故障数据来评价通用振动谱合理性，最终确定空气处理单元支架牵引车和自卸车/货车2种通用振动谱。本文提出的方法可推广用于支架类结构件通用振动谱确定，指导支架类结构件振动耐久试验的开展。

**【关键词】**道路载荷谱，频域加速，通用振动谱，空气处理单元支架

## Research on a Determination Method of Frequency Domain Universal Vibration Spectrum Based on Load Spectrum

He Na, Li Peng, Zhang Lei, Ren Bin, Tian Pengtao  
Shaanxi Heavy Duty Automobile Co., Ltd.

**Abstract:** To reduce the types of road load spectrum collection and reduce the cost of load spectrum collection, this paper proposes a frequency domain accelerated universal vibration spectrum determination method based on road load spectrum. The article takes our company's air handling unit bracket as the research object, and explains the determination method of universal vibration spectrum through research object selection, load spectrum extraction, vibration spectrum calculation and fitting, validation test design, and universal vibration spectrum revision. By comparing and analyzing with market fault data, it is verified that it is effective and reliable. Finally, two types of general vibration spectra, tractor and dump/cargo truck, are determined. The method proposed in this article can be extended to determine the universal vibration spectrum of support structural components, guiding the development of vibration durability tests for support structural components.

**Key words:** road load spectrum, frequency domain accelerated, universal vibration spectrum, air handling unit bracket

## 引言

近年来，频域加速振动试验方法被广泛用于验证汽车零部件尤其是支架类结构件的振动疲劳性能。该方法基于实际道路载荷谱，实现了台架试验与道路试验的有效关联，同时该方法实现试验加速，计算所得到的振动谱可用于电磁振动试验台来开展振动试验，大大缩短了试验时间和降低了试验成本<sup>[1-3]</sup>。

然而，由于频域加速振动试验方法基于道路载荷谱，安装位置、车辆能源类型、驱动形式等发生变化都需进行载荷谱采集，导致道路载荷谱采集费用的增加。为减少道路载荷谱采集种类，降低采集费用，提高振动谱通用性，本文提出一种基于道路载荷谱的频域加速通用振动谱确定方法。以空气处理单元支架为研究对象，首先梳理支架种类、对应车型信息及近三年售后故障数据，接着提取主销车型支架车架固定点或近似车架固定点的道路载荷谱，然后利用频域加速振动的方法计算振动谱，并根据最大振动存在合理性原则拟合通用振动谱曲线，接着设计验证试验来验证通用振动谱的合理性，统计分析试验结果数据并结合售后故障数据修订通用振动谱，最终确定空气处理单元支架牵引车和自卸车/货车2种通用振动谱。

## 1 理论背景<sup>[4,5]</sup>

### 1.1 冲击响应谱 SRS (Shock Response Spectrum)

冲击响应谱是指同一冲击激励经过多个固有频率不同的单自由度系统（简称SDOF）频响函数滤波后提取的最大响应。它是验证频域加速振动试验加速合理性的主要依据之一。

### 1.2 极限响应谱 ERS (Extreme Response Spectrum)

极限响应谱表示在持续时间T内PSD激励SDOF所得到的最大概率的极限幅值，计算公式如下：

$$ERS_{acc}(f_n) = \sqrt{\pi f_n Q G_Z(f_n) \ln(f_n T)} \quad (1)$$

式中， $f_n$ 是固有频率(Hz)；Q是动态放大因子(无量纲)； $G_Z(f_n)$ 是指加速度PSD曲线在 $f_n$ 处的幅值( $\text{g}^2/\text{Hz}$ )；T是PSD激励的持续时间(h或s)。

### 1.3 疲劳损伤谱 FDS (Fatigue Damage Spectrum)

#### (1) 基于时域的FDS

基于时域的FDS是指多个固有频率不同的SDOF在同一冲击激励作用下产生结构响应，通过雨流计数统计各频率下的最大响应，将其加载到S-N曲线上获得各频率下的损伤值，并利用Miner线性准则计算其累计损伤。

## (2) 基于 PSD 的 FDS

Lalanne 推导出的基于 PSD 的 FDS 计算公式如下：

$$FDS(f_n) = f_n T \frac{K^b}{C} \left[ \frac{QG_Z(f_n)}{2(2\pi f_n)^3} \right]^{\frac{b}{2}} \Gamma\left(1 + \frac{b}{2}\right) \quad (2)$$

式中,  $f_n$  是固有频率 (Hz);  $T$  是 PSD 激励的持续时间 (常用 h 或 s);  $K$  是 SDOF 系统的刚度 (kN/mm);  $G_Z(f_n)$  是指加速度 PSD 曲线在  $f_n$  处的幅值 ( $\text{g}^2/\text{Hz}$ );  $b$  和  $C$  是 S-N 曲线的疲劳参数,  $b$  是 S-N 曲线曲线斜率 (无量纲),  $C$  是材料常数 (无量纲);  $\Gamma()$  是 Gamma 函数, 并定义为  $\Gamma(g) = \int_0^\infty x^{(g-1)} e^{-x} dx$ 。

## 1.4 试验合成

根据疲劳损伤等效原则进行试验合成, 在试验合成时要考慮部件的实际载荷、疲劳强度和存活率等问题, 试验合成

PSD 计算公式如下:

$$G_{\text{synth}}(f_n) = \frac{2(2\pi f_n)^3}{Q} \left[ \frac{k \sum FDS(f_n) C}{K^b f_n T \Gamma\left(1 + \frac{b}{2}\right)} \right]^{\frac{2}{b}} \quad (3)$$

式中,  $\sum FDS(f_n)$  是总目标的 FDS (无量纲);  $k$  是安全因子 (无量纲); 其余物理量解释详见式 (2)。

## 2 通用振动谱确定方法

这里以空气处理单元支架通用振动谱确定方法为例对通用振动谱确定方法进行说明。

### 2.1 通用振动谱确定技术路线

为了获得准确的通用振动谱, 特制订如图 1 所示的技术路线。

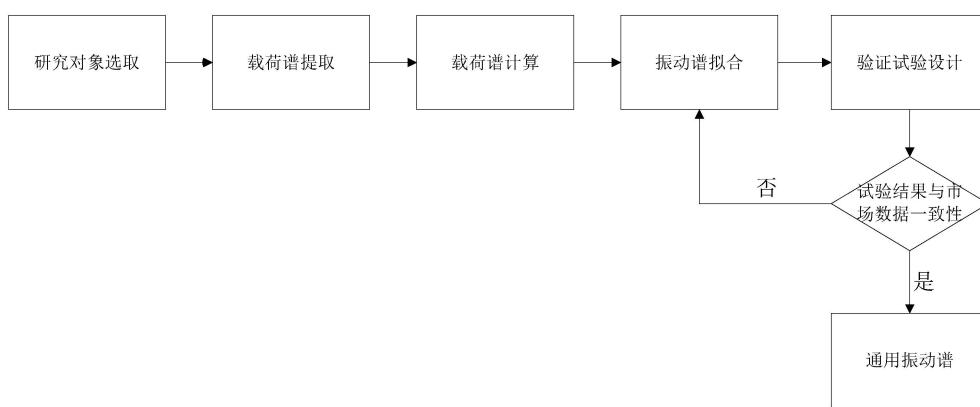


图 1 技术路线

## 2.2 研究对象选取

统计梳理空气处理单元支架种类以及应用车型信息, 并对得到的支架进行评估筛选, 选定如表 1 所列的 8 种支架作为研究对象, 并统计每种支架的车架安装位置信息。通过公司的售后信息查询平台查询 8 种支架近三年的售后故障信息, 包括故障类型、故障数量等信息。

表 1 研究对象

序号	支架类型	应用车型
1	支架 1	国内牵引车
2	支架 2	出口牵引车
3	支架 3	国内危化品牵引车
4	支架 4	载货/自卸/专用
5	支架 5	货车
6	支架 6	牵引车
7	支架 7	某自卸车 1
8	支架 8	某自卸车 2

注: 上表中支架 7 和支架 8 应用车型为新开发车型, 无售后故障数据。

## 2.3 载荷谱提取

根据选定的 8 种支架采集道路载荷谱数据, 这里的道路载荷谱数据为支架在各车型车架固定点或近似车架固定点位置所采集得到的数据, 如图 2 所示。考虑到牵引车、自卸车和货车的车架布局及空气处理单元支架的安装位置, 将载荷谱分为牵引车和自卸车/货车 2 类。考虑到应用车型种类多, 这里选取 11 辆主销车型载荷谱作为目标对象, 见表 2。

表 2 载荷谱信息

序号	车型	车辆类型	试验场
1	车型 1	牵引车	试验场 1
2	车型 2	牵引车	试验场 1
3	车型 3	牵引车	试验场 2
4	车型 4	牵引车	试验场 2
5	车型 5	牵引车	试验场 3
6	车型 6	自卸车	试验场 1
7	车型 7	自卸车	试验场 2
8	车型 8	自卸车	试验场 2
9	车型 9	自卸车	试验场 3
10	车型 10	载货车	试验场 1
11	车型 11	载货车	试验场 3

注: 按照目前我公司执行的整车道路可靠性试验规范, 试验场 1、试验场 2 和试验场 3 与用户关系系数一致, 即在同一整车在这 3 个试验场可靠性试验目标里程相同。

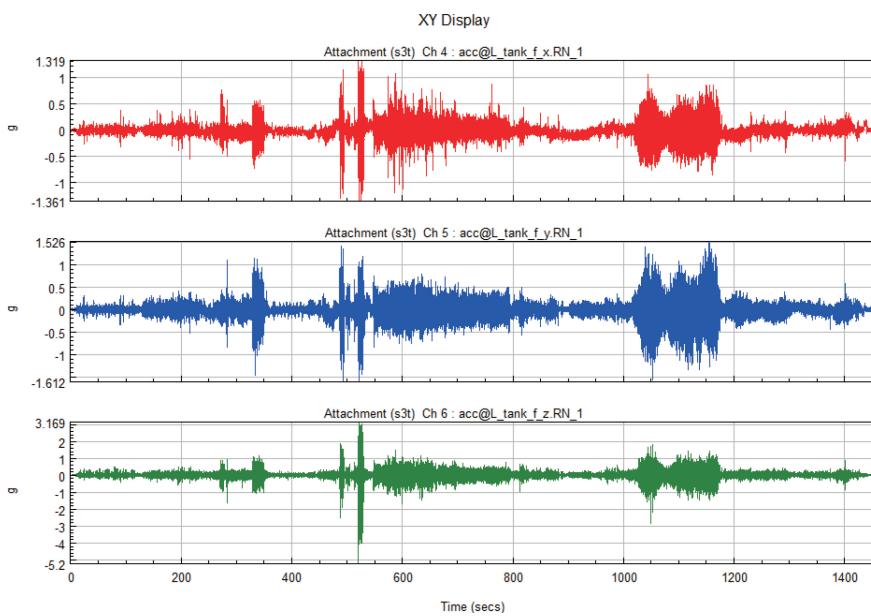


图 2 空气处理单元支架道路载荷谱

## 2.4 振动谱计算及拟合

对 2.3 获得的加速度信号进行去毛刺、去漂移等异常修

正和滤波处理。利用频域加速振动的方法计算其振动谱，计算流程如图 3 所示。

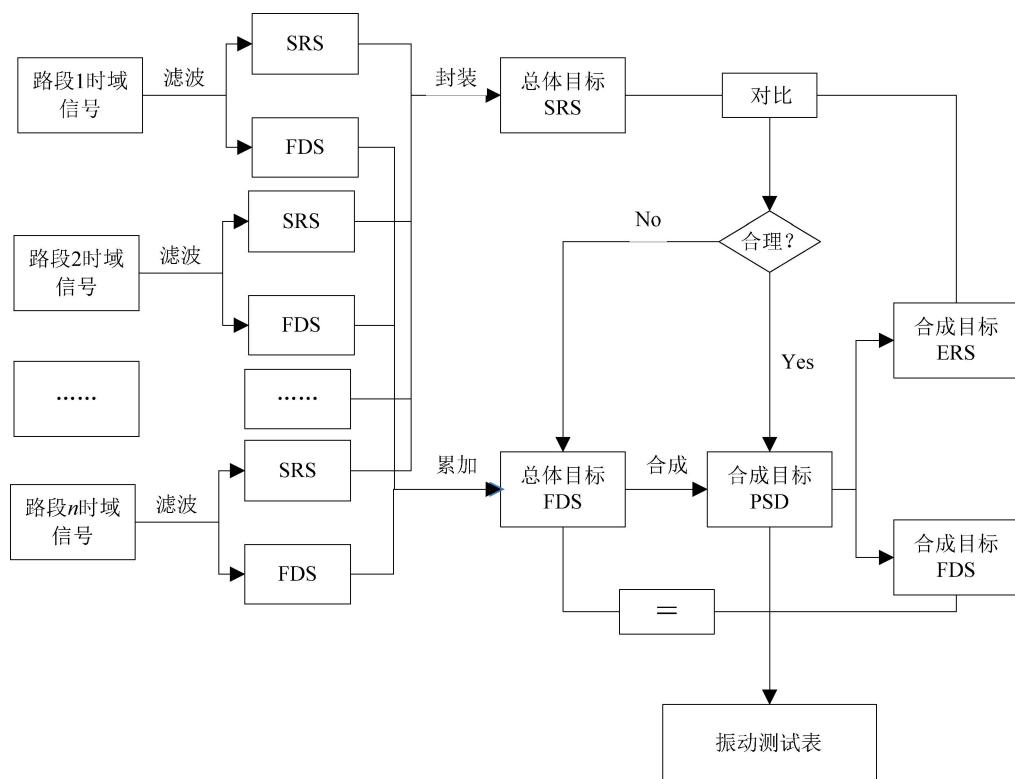


图 3 频域加速振动谱计算流程

根据最大振动存在合理性原则拟合通用振动谱，对 5 个牵引车振动谱进行拟合时发现，试验场 2 与试验场 1 和试验场 3 特征路面差异较大，从特征路面丰富性角度考虑振动谱拟合以试验场 1 和试验场 3 振动谱为主，同时兼顾试验场 2 的 (8~15) Hz 振动能量，拟合得到牵引车通用振动谱曲线如图 4 所示，主要参数见表 3。

表 3 牵引车通用振动谱参数

振动方向	X	Y	Z
振动谱 RMS/g	0.341	0.524	0.674
试验时间/h	15	30	30

根据最大振动存在合理性原则拟合通用振动谱，对 6 辆

自卸车/货车振动谱进行拟合时发现,试验场2与试验场1、试验场3特征路面差异较大,考虑到空载工况对支架影响较大,且试验场3数据中包括空载工况,从特征路面丰富性和工况丰富性角度考虑振动谱拟合以试验场1和试验场3振动

谱为主,同时兼顾试验场2的(8~15)Hz振动能量,拟合得到自卸车/货车通用振动谱曲线如图5所示,主要参数见表4。

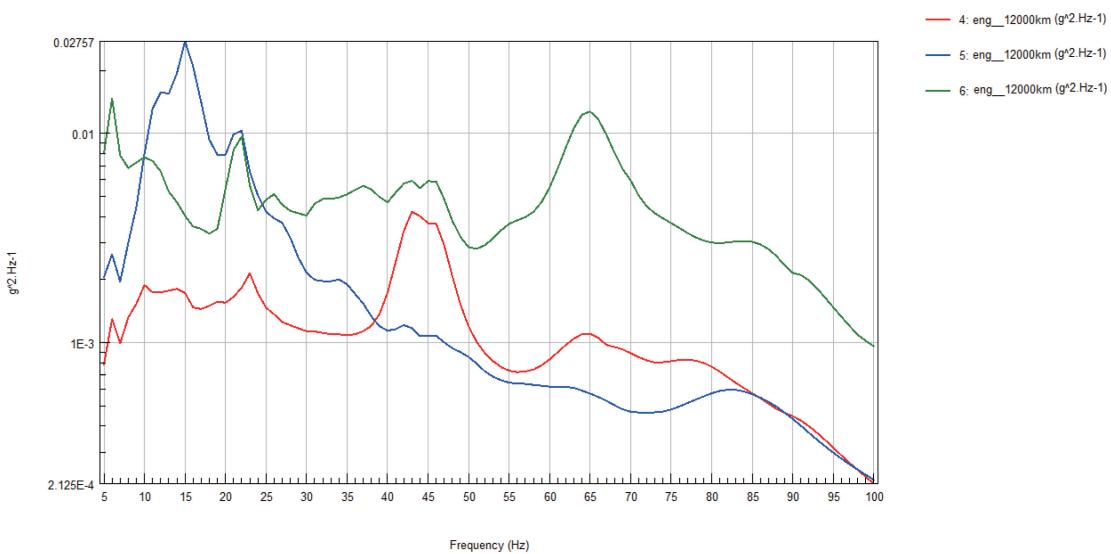


图4 牵引车通用振动谱曲线

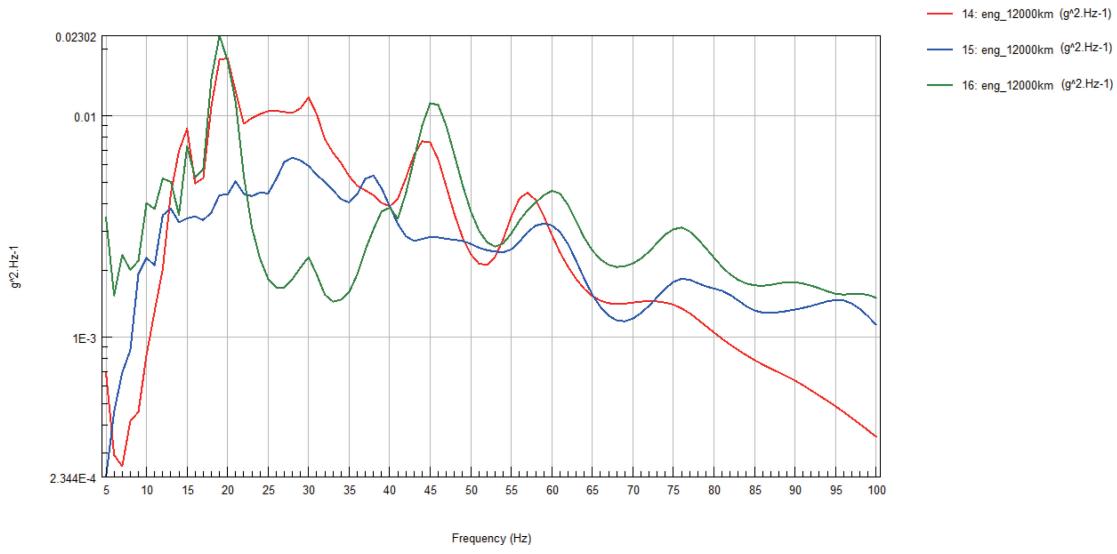


图5 自卸车/货车通用振动谱曲线

表4 自卸车/货车通用振动谱参数

振动方向	X	Y	Z
spectral RMS/g	0.611	0.507	0.612
试验时间/h	30	30	30

## 2.5 验证试验设计

设计验证试验对2.4拟合得到的通用振动谱合理性进行验证。考虑到支架市场应用情况,从8种支架里选取6种支架作为验证试验的试验对象,剩余2种支架为新开发车型应用,不作为验证试验对象,验证试验设计详见表5。

表5 验证试验设计

序号	支架类型	试验振动谱	样件数量	备注
1	支架1	牵引车通用谱	2	如果出现振动谱修订,则样件个数随之增加
2	支架2		2	
3	支架3		2	
4	支架6		2	
8	支架5	自卸车/载货车通用谱	2	
7	支架4		2	

将表5中样件按照实车装配方式固定在振动试验台上,如图6所示,按照试验顺序Z-Y-X的开展振动试验,记录振动试验过程中样件出现失效的时间、故障模式等信息。

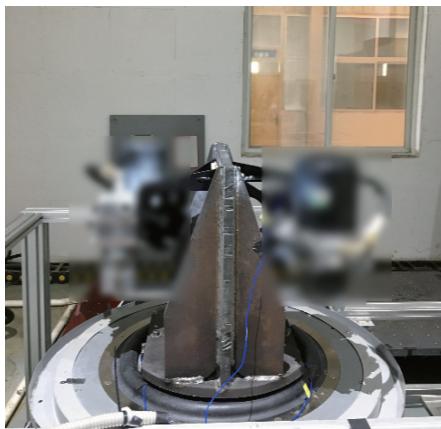


图 6 振动试验照片

## 2.6 通用振动谱修订

统计分析 2.5 试验结果，并结合 2.2 所梳理支架售后故障数据，对 2.4 所得到的通用振动谱合理性进行评价，若出现试验结果与售后故障不一致则需对通用振动谱进行修订，重新设计验证试验。

首先对牵引车通用振动谱合理性进行分析，见表 6。

表 6 牵引车通用振动谱合理性分析

支架类型	试验结果	市场故障情况	试验结果与售后故障是否一致
支架 1	75h 后均无故障	有故障数据	试验通过，但有售后故障数据，分析原因：支架在该统计周期内故障率低，且故障为早期失效，推测是样件工艺、材料等制造缺陷引起，不是结构疲劳引起的故障，通过加强工艺管控可避免故障，故认为试验结果与售后故障结果可视同一致
支架 2	试验运行 35h，样件筋端部处板件开裂	有故障数据	试验不通过，有故障数据，一致，需对该样件进行整改
支架 3	75h 后均无故障	无故障数据	试验通过，市场无故障，一致
支架 6	75h 后均无故障	无故障数据	试验通过，市场无故障，一致

通过表 6 分析可看出，通过对牵引车空气处理单元支架试验结果与售后故障情况，认为试验结果与售后故障基本一致，说明该牵引车通用振动谱合理，可应用。

接着对自卸车/货车通用振动谱合理性进行分析，发现支架 5 的试验结果与售后故障数据不一致，通过对载荷谱数据、样件固有频率以及样件安装固定方式等进行分析，修订自卸车/货车通用振动谱，修订后振动谱主要参数详见表 7 所示，然后再通过设计验证试验对修订后的通用振动谱合理性进行验证，合理性分析结果见表 8。

表 7 自卸车/货车通用振动谱主要参数

振动方向	X	Y	Z
振动谱 RMS/g	0.611	0.507	0.594
试验时间/h	30	30	30

表 8 自卸车/货车通用振动谱合理性分析

支架类型	试验结果	市场故障情况	试验结果与售后故障是否一致
支架 5	90h 后均无故障	无故障数据	试验通过，市场无故障，一致
支架 4	90h 后均无故障	有故障数据	试验通过，但有售后故障数据，从首次故障里程可看出，该故障均为早期失效，推测由于样件工艺、材料等缺陷引起，不是结构疲劳引起的故障，后通过加强工艺管控可避免该问题，故试验结果与售后故障结果可视同一致

通过表 8 分析可看出，通过对自卸车/货车空气处理单元支架试验结果与售后故障情况，认为试验结果与售后故障基本一致，说明该自卸车/货车通用振动谱合理，可应用。

## 3 结论

本文提出了一种基于道路载荷谱的频域通用振动谱确定方法，减少了道路载荷谱的采集种类，降低了采集费用，提高了振动谱的通用性。文中以空气处理单元支架为研究对象，通过研究对象选取、载荷谱提取、振动谱计算及拟合、验证试验设计、通用振动谱修订等过程对通用振动谱确定方法进行说明，通过与售后故障数据进行对比分析验证通用振动谱有效可靠，最终确定空气处理单元支架牵引车和自卸车/货车 2 种通用振动谱。本文提出的方法可推广用于支架类结构件通用振动谱确定，指导支架类结构件振动耐久试验的开展。

## 参 考 文 献

- [1] 王霄峰. 汽车可靠性工程基础 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- [2] 贺娜, 张磊, 等. 一种基于损伤谱统计值的频域加速振动试验方法探究 [C]//中国汽车工程学会. 2022 年中国汽车工程学会年会论文集: 北京: 机械工业出版社, 2022: 2089-2094.
- [3] 贺娜, 张磊, 等. 一种基于试验的频域加速系数确定方法探究 [C]//中国汽车工程学会. 2021 年中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2021: 2833-2836.
- [4] HALFPENNY A. Mission Profiling and Test Synthesis based on fatigue damage spectrum [Z]. Ref. FT342, 9<sup>th</sup> Int. Fatigue Cong. Atlanta, USA, 2006.
- [5] nCode. Glyph Reference Guide [EB/OL], 2012. Available from [www.ncode.com](http://www.ncode.com).