



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

## 道路车辆 电动汽车驱动系统用电气及电子设备的环境条件和试验 第3部分：机械负荷

Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment for drive system of electric propulsion vehicles – Part 3: Mechanical loads

(ISO 19453-3: 2018,MOD)

(征求意见稿)

(本草案完成时间：2021年8月30日)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会

## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 试验和要求 .....	1
4.1 振动 .....	1
4.2 机械冲击 .....	9
4.3 自由跌落 .....	10
4.4 外表强度/划痕和耐磨性能 .....	11
4.5 碎石冲击 .....	11
5 机械负荷代码字母 .....	11
附录 A (资料性) 振动试验曲线建立指南 .....	13
A.1 范围 .....	13
A.2 一般规定 .....	13
A.3 平均控制方法 .....	15
A.4 确定动力系统振动特性和试验持续时间的方法 .....	15
A.5 测定车身振动曲线和试验时间的方法 .....	22
A.6 对 Basquin 模型的解释 .....	26
A.7 循环次数的测量数据 .....	28
附录 B (资料性) 按设备安装位置推荐的机械要求 .....	33
参考文献 .....	34

# 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是GB/T XXXX《道路车辆 电动汽车驱动系统用电气及电子设备的环境条件和试验》的第3部分。GB/T XXXX 已经发布了以下部分：

- 第1部分：一般规定；
- 第3部分：机械负荷；
- 第4部分：气候负荷；
- 第5部分：化学负荷。

本文件修改采用ISO 19453-3：2018《道路车辆 电动汽车驱动系统用电气及电子设备的环境条件和试验 第3部分：机械负荷》。

本文件与ISO 19453-3:2018相比做了下述结构调整：

- 删除 ISO 19453-3:2018 中的第 6 章。

本文件与ISO 19453-1：2018的技术差异及其原因如下：

- 删除 ISO 和 IEC 用于标准化的维护术语数据库地址，本文件涉及的术语与 ISO 和 IEC 用于标准化的维护术语的数据库无关；
- 增加了碎石冲击的试验方法；
- 将 A. 4. 1. 2 以 Basquin 模型为基础使用加速疲劳试验等效损伤理论方法计算时  $T_1$  代入的数值由 60 改为 600，原文件印刷错误。

本文件做了下列编辑性改动：

- 删除国际标准的前言。

本文件由中华人民共和国工业和信息化部提出。

本文件由全国汽车标准化技术委员会（SAC/TC 114）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# 道路车辆 电动汽车驱动系统用电气及电子设备的环境条件和试验

## 第3部分：机械负荷

### 1 范围

本文件规定了最大工作电压为B级电压的电驱动系统和部件的要求。

本文件不适用于高压电池包（如动力电池包）和系统或内部部件。

本文件描述了潜在的环境应力、试验和车辆上或车辆内不同应力等级下的推荐要求。

本文件描述了机械负荷。

### 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2423.5 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ea和导则：冲击（GB/T 2423.5—2019，IEC 60068-2-27：2008，IDT）

GB/T 2423.7 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ec：粗率操作造成的冲击（主要用于设备型样品）（GB/T 2423.7—2018，IEC 60068-2-31：2008，IDT）

GB/T 2423.22 环境试验 第2部分：试验方法 试验N：温度变化（GB/T 2423.22—2012，IEC 60068-2-14：2009，IDT）

GB/T 2423.56 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—2018，IEC 60068-2-64：2008，IDT）

GB/T 2423.58 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Fi：振动 混合模式（GB/T 2423.58—2018，IEC 60068-2-80：200，IDT）

GB/T 28046.1 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第1部分：一般规定（GB/T 28046.1—2011，ISO 16750-1：2006，MOD）

GB/T XXXX.1 道路车辆 电动汽车驱动系统用电气及电子设备的环境条件和试验 第1部分：一般规定（GB/T XXXX.1—20XX，ISO 19453-1：2018，MOD）

GB/T XXXX.4-20XX 道路车辆 电动汽车驱动系统用电气及电子设备的环境条件和试验 第4部分：气候负荷（ISO 19453-4：2018，MOD）

### 3 术语和定义

GB/T 28046.1和GB/T XXXX.1界定的术语和定义适用于本文件。

### 4 试验和要求

#### 4.1 振动

##### 4.1.1 一般规定

按电气和电子设备在车上应用情况规定了不同振动严酷度的试验方法。供需双方可根据特定的安装位置选择试验方法、环境温度和振动参数。

规定的量级是得到车辆测量结果之前所能得到的最佳估计值，但不能代替车辆的测量值。

规定的量级用于直接安装在所定义的位置。使用支架安装会提高或降低负荷。应该根据车辆实际情况进行振动试验。

对DUT进行振动试验时应将样品安装在振动台面上，将安装方法记录在报告中。正弦振动和正弦随机振动的正弦部分扫频速率为0.5 oct/min。推荐的振动试验用于避免使用过程中因疲劳引起的失效和损坏，本文件不包括特殊的磨损试验要求。

在规定频率范围外的负荷应单独考虑。

注：对于大而重的DUT，因刚性安装和动态响应，按本文件进行振动试验负荷的偏差可能导致在振动台上的激励不同于实际情况，用平均控制方法可以将偏差最小化（见A.3）。

经协商可按 GB/T 2423.56采用加权平均值控制方法。

DUT在振动试验期间的温度循环按GB/T 2423.22和图1通电运行。经协商可在恒温条件下进行试验。

如图1所示在整个装置达到 $T_{min}$ 后使DUT通电运行，用尽可能短的时间检查DUT的功能（使DUT的自产热量最小）。长时间的通电运行在温度达到室温时开始进行。

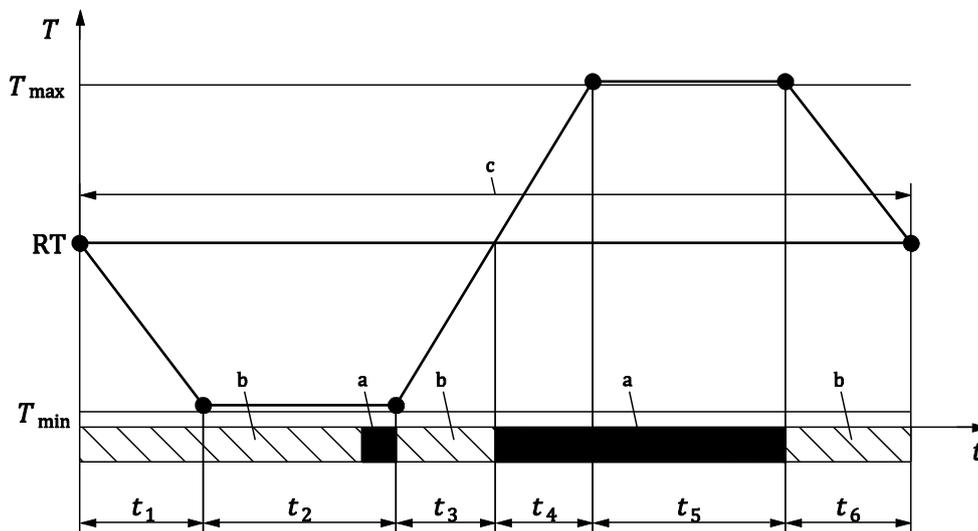
对试验箱不允许进行辅助烘干。

在试验中应模拟机械应力和温度变化应力同时作用，车辆振动应力可能在 $T_{min}$ 或 $T_{max}$ 下出现，例如系统/部件的塑料件经高温变软而不能承受当前加速度。

应单独测量确定DUT在 $T_{max}/T_{min}$ 的保持时间，保证DUT整体在该温度下的保持时间。在振动试验期间，DUT整体的温度应至少保持1小时。因此，温度循环需要进行相应的调整。

允许进行功能性的措施避免DUT在具有自热效应的高温工作中过热。

完整的温度循环曲线应分别包括超过1小时保温时间的 $T_{min}$ 和 $T_{max}$ ，供需双方应对完整的温度循环曲线达成一致。



说明：

- $T$  —— 温度， $^{\circ}\text{C}$ ；
- $t$  —— 时间，h；
- $T_{min}$  —— 最低工作温度；
- $T_{max}$  —— 最高工作温度；
- RT —— 室温；
- $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$  —— 时间参数；
- a —— 工作模式 4.2；

- b ——工作模式 2.1;  
c ——一个周期。

图1 振动试验温度曲线

如果工作模式4.2在技术上不可行，可用工作模式3.2代替。对于电机，为了避免与实际不符的失效情况，如轴承由于输入的振动而磨损，可以在工作模式3.2或4.2下进行试验。

表1 振动试验温度与时间的对应关系

参数	持续时间 h	温度
$t_1$	按协议	从RT至 $T_{\min}$
$t_2$	>1	保持在 $T_{\min}$
$t_3$	按协议	从 $T_{\min}$ 至RT
$t_4$	按协议	从RT至 $T_{\max}$
$t_5$	>1	保持在 $T_{\max}$
$t_6$	按协议	从 $T_{\max}$ 至RT

注： $T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 见GB/T XXXX. 4—20XX表1（代码A至代码X）。在实际环境中，部分零部件会经受不同的温度、温度变化速率、持续时间等条件，以上情况可使用代码Z。

#### 4.1.2 试验

##### 4.1.2.1 试验 1—乘用车动力系统（内燃机、变速箱）

###### 4.1.2.1.1 目的

检验动力系统上的DUT因受振动导致的故障和损坏。

动力系统的振动可以分为3种类型：

- 由气缸不平衡质量作用于连杆上产生的正弦振动；
- 由发动机其他振动源产生的随机振动，如阀门的关闭；
- 由不平整路面引起的随机振动。

注：如果需要对DUT在共振频率下的影响进行试验，共振频率可根据GB/T 2423.10—2019的8.3.2进行测量。

###### 4.1.2.1.2 试验

###### 4.1.2.1.2.1 一般规定

动力系统的振动包括由曲轴转动和发动机燃烧引起的正弦随机振动和在粗糙路面行驶引起的随机振动。试验时间应至少为一个温度循环周期且DUT整体温度在 $T_{\max}/T_{\min}$ 的保持时间符合要求。

注1：根据A.4.1.2和A.4.1.3确定试验时间。根据A.6的Basquin的方程，可相应地调整试验时间和振动载荷水平。

注2：供需双方协商一致时，可根据Basquin的模型，使用该部件特定的S-N曲线斜率 $k$ 调整试验时间（见A.6）。对于自由放置或预期不会安装在某个位置和方向的部件（如逆变器），可将三个轴向最严酷的条件用于三个轴向的试验。

注3：电机的驱动轴平行于地面，因此有一个特定方向的剖面将垂直激励与水平激励区分。

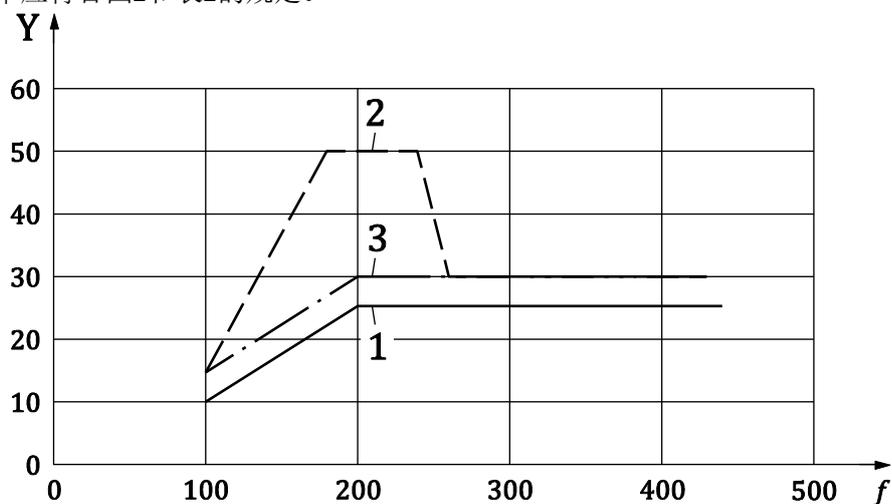
坐标系的定义见表A.3。

###### 4.1.2.1.2.2 正弦随机振动

按照 GB/T 2423.58的要求进行混合模式振动试验。

## a) 正弦振动部分

扫频速率不大于0.5oct/min, DUT每个轴向的试验时间为33h, 正弦随机振动中的正弦振动部分的试验加速度与频率应符合图2和表2的规定。



说明:

- Y —— 振幅加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  
 $f$  —— 频率, Hz;  
 1 —— X轴曲线;  
 2 —— Y轴曲线;  
 3 —— Z轴曲线。

图2 最大加速度与频率

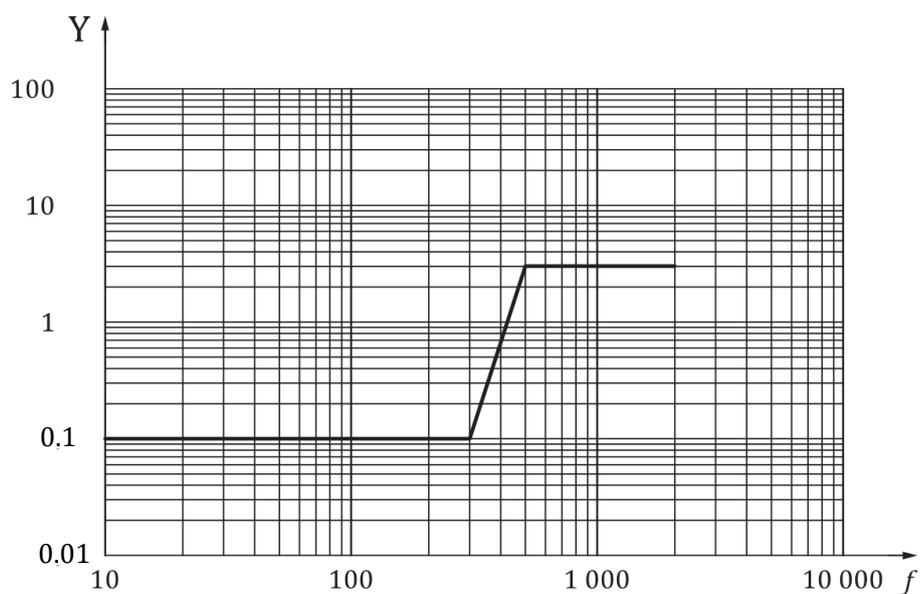
表2 最大加速度与频率

X轴向		Y轴向		Z轴向	
频率 Hz	最大加速度 $\text{m/s}^2$	频率 Hz	最大加速度 $\text{m/s}^2$	频率 Hz	最大加速度 $\text{m/s}^2$
100	10	100	15	100	15
200	25	180	50	200	30
440	25	240	50	440	30
—	—	260	30	—	—
—	—	440	30	—	—

## b) 随机振动部分

按照 GB/T 2423.56进行试验, DUT每个轴向的试验时间为33h, 加速度均方根(r.m.s)值应为 $68.7\text{m/s}^2$ 。对于正弦随机振动中的随机振动部分, 三个轴向的振动载荷相等。因此对于三个轴向, 只有一个试验曲线。功率谱密度随频率的变化应符合图3和表3的规定。

注: 功率谱密度(随机振动)在100-500Hz的正弦振动的频率范围内减小, 在10-100Hz的低频范围内由于路面粗糙产生的影响可忽略不计(见A. 4. 1. 1)。



说明:

Y ——PSD,  $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ ;

$f$  ——频率, Hz;

图3 PSD 与频率

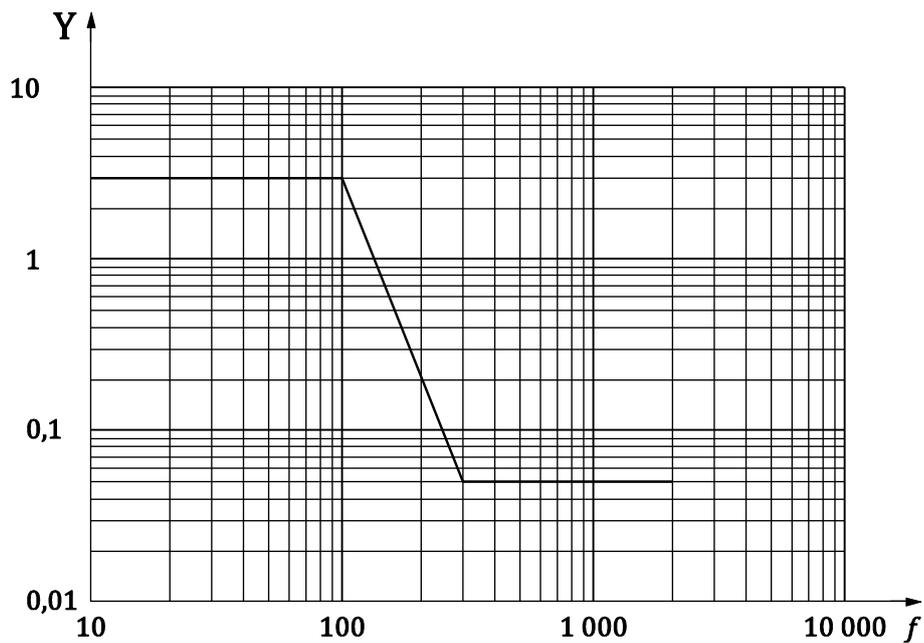
表3 PSD 与频率

频率 Hz	PSD $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$
10	0.1
300	0.1
500	3
2000	3

#### 4.1.2.1.2.3 随机振动

内燃机和齿轮箱在高转速下的振动不会与粗糙路面的振动同时发生，因此需要单独进行宽带随机振动试验。

在低频率10Hz-100Hz范围内，应考虑粗糙路面条件的影响。本试验引起的主要失效是由疲劳造成的损坏。DUT在正弦随机振动试验之后，按照 GB/T 2423.56进行随机振动试验。DUT每个轴向的试验持续时间为10h，三个轴向的加速度均方根(r.m.s)值应为 $21.4 \text{ m/s}^2$ ，功率谱密度随频率的变化应符合图4和表4的规定。



说明:

Y ——PSD,  $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ ;

$f$  ——频率, Hz;

图4 PSD 与频率

表4 PSD 与频率

频率 Hz	PSD $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$
10	3
100	3
300	0.05
2000	0.05

#### 4.1.2.1.3 要求

不允许出现故障和损坏。在GB/T XXXX.1定义的工作模式3.2或工作模式4.2时,功能状态应达到A级;在GB/T XXXX.1定义的其他工作模式时,功能状态应达到C级。

#### 4.1.2.2 试验 2—乘用车弹性体(车身)

##### 4.1.2.2.1 目的

检验安装在车身上的DUT因振动导致的故障和损坏。

##### 4.1.2.2.2 试验

###### 4.1.2.2.2.1 一般规定

车身的振动是在粗糙路面行驶引起的随机振动。本试验引起的主要失效是由疲劳造成的损坏。

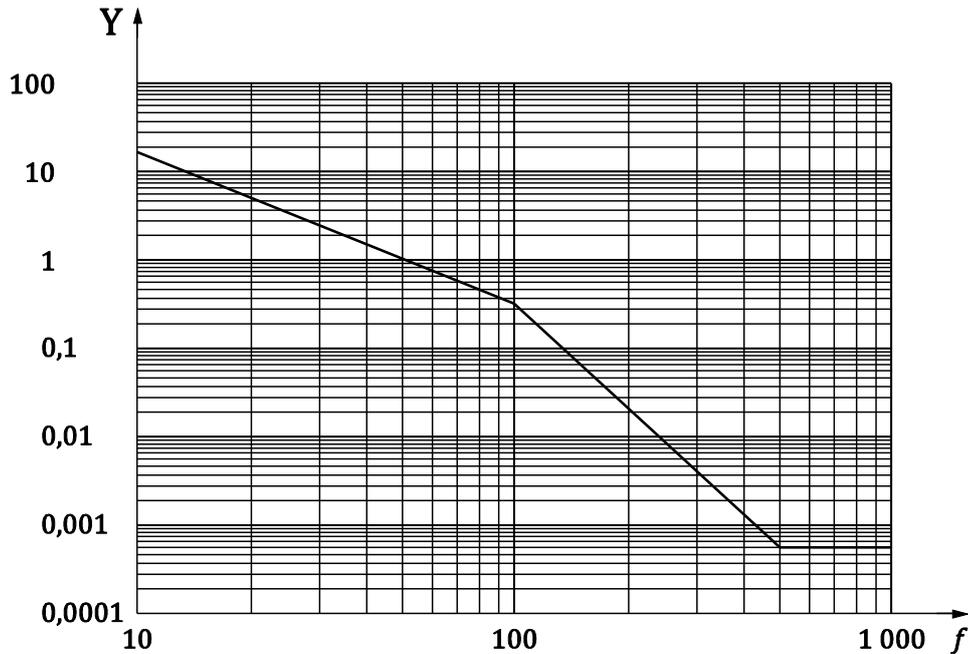
注1:试验持续时间依据A.5.1.2和A.5.1.3得到。根据附录A,每个轴向20h试验持续时间相当于车辆寿命6000h(以40km/h的平均速度行驶240000km)。

注2：当安装一个较重的DUT，试验系统无法实现当前试验条件时，可根据Basquin模型调整负荷和持续时间。（见A.6）

坐标系的定义见表A.2。

4.1.2.2.2.2 随机振动

按照 GB/T 2423.56进行随机振动试验，DUT每个轴向的试验持续时间为20h，三个轴向的加速度均方根(r.m.s)值应为13.3 m/s<sup>2</sup>，功率谱密度随频率的变化应符合图5和表5的规定。



说明：

Y —— PSD, (m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz;

f —— 频率, Hz;

图5 PSD 与频率

表5 PSD 与频率

频率 Hz	PSD (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz
10	17
100	0.33
500	0.0006
1000	0.0006

4.1.2.2.3 要求

不允许出现故障和损坏。在GB/T XXXX.1定义的工作模式3.2或工作模式4.2时，功能状态应达到A级；在GB/T XXXX.1定义的其他工作模式时，功能状态应达到C级。

4.1.2.3 试验 3-电动汽车，（直接装备）电机

4.1.2.3.1 目的

检验DUT因振动导致的故障和损坏。

#### 4.1.2.3.2 试验

##### 4.1.2.3.2.1 一般规定

电机的振动是粗糙路面行驶引起的随机振动。本试验引起的主要失效是由疲劳造成的损坏。

注1：试验持续时间依据A.5.1.2和A.5.1.3得到。根据附录A，每个轴向20h试验持续时间相当于车辆寿命6000h（以40km/h的平均速度行驶240000km）。

注2：当安装一个较重的DUT，试验系统无法实现当前试验条件时，可根据Basquin模型调整负荷和持续时间（见A.6）。

注3：电机的驱动轴平行于地面，因此有一个特定方向的剖面将垂直激励与水平激励区分。

坐标系的定义见表A.4。

##### 4.1.2.3.2.2 随机振动

按照 GB/T 2423.56进行随机振动试验，DUT每个轴向的试验持续时间为20h，三个轴向的加速度均方根值应为：

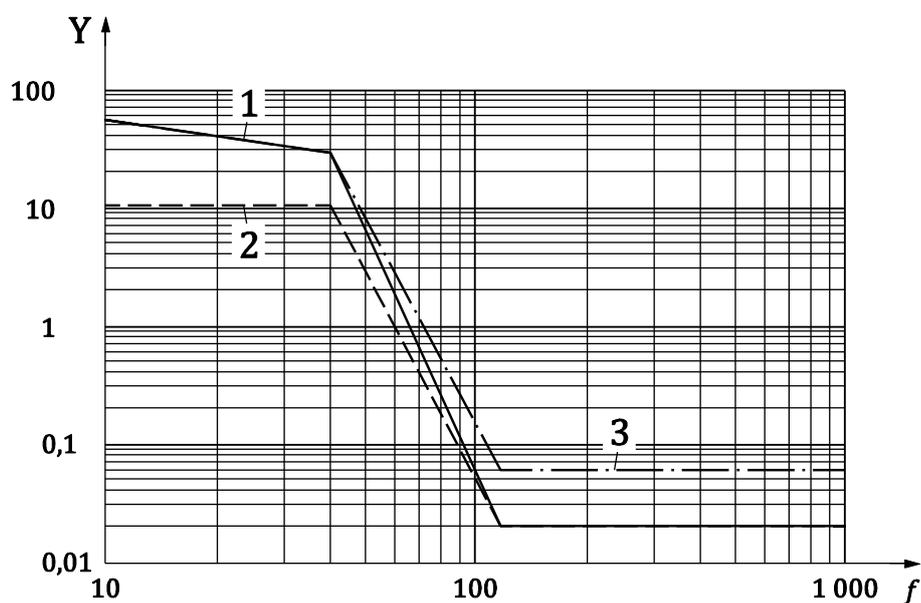
——X：35.1 m/s<sup>2</sup>

——Y：20.5 m/s<sup>2</sup>

——Z：36.2 m/s<sup>2</sup>

功率谱密度随频率的变化应符合图6和表6的规定。

对于自由放置或不以特定方向安装的部件（如逆变器），三个轴向的条件适用于初始位置定义的三个轴向。



说明：

Y ——PSD, (m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz;

f ——频率, Hz;

1 ——X轴曲线;

2 ——Y轴曲线;

3 ——Z轴曲线。

图6 PSD与频率

表6 PSD 与频率

频率 Hz	PSD (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz		
	X轴向	Y轴向	Z轴向
10	55	11	55
40	28	11	28
120	0.02	0.02	0.06
1000	0.02	0.02	0.06

#### 4.1.2.3.3 要求

不允许发生故障和损坏。在GB/T XXXX.1定义的工作模式3.2或工作模式4.2时，功能状态应达到A级；在GB/T XXXX.1定义的其他工作模式时，功能状态应达到C级。

## 4.2 机械冲击

### 4.2.1 冲击 1-样品安装在车身和车架刚性点上

#### 4.2.1.1 目的

检验DUT因受车身或车架冲击导致的失效和损坏。

负荷发生在高速驾驶越过路边石头的情况。失效模式为机械损坏（例如由于高加速度冲击使电子控制模块壳内的电容器分离）。

#### 4.2.1.2 试验

按照 GB/T 2423.5,采用下列参数进行试验：

- DUT工作模式：3.2（见GB/T XXXX.1）；
- 冲击脉冲型式：半正弦波；
- 加速度：500m/s<sup>2</sup>；
- 持续时间：6 ms；
- 冲击次数：每个试验方向10次。

冲击试验的加速度方向应与车辆发生冲击实际产生的加速度方向相同，如果实际方向未知，DUT应在6个方向上进行试验。

#### 4.2.1.3 要求

不允许发生故障和损坏。功能状态应达到GB/T XXXX.1定义的A级。

### 4.2.2 冲击 2-样品安装在变速器内/上

#### 4.2.2.1 目的

检验DUT因受换挡冲击导致的失效和损坏。

本试验适用于专门安装在变速器内/上的DUT。

负载发生在气动助力换挡操作中。失效模式为机械损坏（例如，由气动助力换挡操作产生的高加速度冲击使电子控制模块壳内的电容器分离）。

#### 4.2.2.2 试验

按照GB/T 2423.5,采用下列参数进行试验:

- DUT工作模式: 3.2 (见GB/T XXXX.1);
- 冲击脉冲型式: 半正弦波;
- 典型的最大加速度: 由供需双方协商;
- 典型的持续时间: <1 ms;
- 温度: 由供需双方协商;
- 冲击次数: 由供需双方协商。

实际冲击强度由变速箱的安装位置和设计特点决定,对于每一种试验需有相应的测量方法决定(推荐取样频率至少为25kHz)。试验须由供需双方协商进行。

试验时冲击加速度应与在车上实际工作时所受的冲击加速度方向一致。如果实际方向未知,DUT应在所有6个方向上进行试验。

#### 4.2.2.3 要求

不允许发生故障和损坏。功能状态应达到GB/T XXXX.1定义的 A级。

### 4.3 自由跌落

#### 4.3.1 目的

检验DUT因自由跌落导致的失效和损坏。

系统/部件在加工处理过程中可能跌落到地面(如在汽车生产线上)。如果跌落后系统/部件有明显的损坏要被更换,如损坏不明显,就会被装上车,然后按正常的产品要求工作。失效模式为机械损坏(例如,DUT落到地面上产生的高加速度使电子控制模块壳内的电容器分离)。

#### 4.3.2 试验

能耐受冲击而无明显损坏的部件应按 GB/T 2423.7进行试验,跌落后会明显损坏的部件(如前照灯)不予试验。

采用如下参数进行试验:

- DUT 数量: 3;
- 每个 DUT 跌落次数: 2;
- 落差: 从表 7 中选取;
- 撞击面: 混凝土地板或钢板;
- DUT 方向: 每个 DUT 的第 1 次跌落应在不同的空间轴向,第 2 次跌落与第 1 次的空间轴向相同,但方向相反;
- DUT 工作模式: 1.1 (见 GB/T XXXX.1);
- 温度: 由供需双方协商。

跌落试验后目视检查DUT。

表7 跌落高度

代码	跌落高度 mm
A	250
B	100
C	25
Z	由供需双方协商

注：按照 GB/T 2423.7—2018中5.2.3，依据DUT的质量，来确定合适的跌落高度。

### 4.3.3 要求

不允许有隐性损坏，在不影响DUT性能的情况下允许外壳有微小损坏，应在试验后验证DUT性能。功能状态应达到GB/T XXXX.1定义的C级。

### 4.4 外表强度/划痕和耐磨性能

试验要求由供需双方协商（例如控制部件和钥匙上的标记和商标应保持清晰可见）。

### 4.5 碎石冲击

#### 4.5.1 目的

通过检查DUT对冷铁砂砾投射到被测表面的抵抗能力，模拟小石子对DUT的冲击。

本试验仅适用于安装在行驶过程中可能受到碎石冲击的部件上的DUT。如供需双方协商一致，可不进行本试验。

#### 4.5.2 试验方法

按照ISO 20567-1：2017进行试验。供需双方协商确定使用ISO 20567-1：2017中表2的严酷等级A、B或C。

注：ISO 20567-1：2017的8.2条和8.3条与本试验相关。

试验时，可能使用DUT的一部分来代替整个样品进行试验，考虑DUT在车辆上的安装方向，供需双方应对DUT在设备上的固定方向达成一致。

#### 4.5.3 要求

功能状态应达到GB/T XXXX.1定义的C级。

如果使用DUT的一部分进行试验，应按照下列要求之一进行功能检查：

- 在碎石冲击过程中对整个DUT进行试验，试验后进行功能检查；
- 使用DUT的一部分进行试验，试验后用该部分重新组装DUT后进行功能检查；
- 使用DUT的一部分进行试验，试验后无法用该部分重新组装DUT时，供需双方可协商替代要求。

## 5 机械负荷代码字母

见表8。根据安装位置，DUT推荐的机械负荷要求见附录B（表B.1）。

表8 试验和要求代码

要求代码						
条款	4.1.2.1	4.1.2.2	4.1.2.3	4.2.1	4.2.2	4.3
代码字母	试验1	试验2	试验3	冲击1	冲击2	自由跌落
A	√	—	—	—	—	√
B	√	—	—	—	√	√
C	—	√	—	—	—	√
D	—	√	—	√	—	√
E	—	—	√	—	—	√

F	—	—	√	—	√	√
Z	由供需双方协商					

**附录 A**  
(资料性)  
**振动试验曲线建立指南**

**A.1 范围**

有助于本文件的使用者根据振动测量结果按照可再现的方法建立试验曲线，从而消除误差。

**A.2 一般规定**

建立试验曲线的过程宜采用推荐的文件加以说明、表A.1-A.5加以描述。

**表A.1 试验定义**

项目	描述
标称转速	$n_{\text{nominal}}$ : 发动机最大输出功率时的转速
最大转速	$n_{\text{max}}$ : 发动机最大安全转速

**表A.2 车辆坐标轴**

项目	描述
车辆坐标轴	X': 车辆行驶方向 Y': 垂直于车辆行驶方向和竖直方向 Z': 竖直方向（垂直于地面方向）

**表A.3 动力系统坐标轴**

项目	描述
动力系统坐标轴	X: 曲轴方向 Y: 垂直于曲轴方向和活塞方向 Z: 活塞方向

**表A.4 电机坐标轴**

项目	描述
电机坐标轴	$X_{EM}$ : 车辆行驶方向（电机的驱动轴平行于地面） $Y_{EM}$ : 垂直于车辆行驶方向和竖直方向 $Z_{EM}$ : 竖直方向（垂直于地面方向）

表A.5列出了一些基本定义，用于评估车辆的测量以创建一个试验参数。车辆和动力系统的坐标系见表A.2、表A.3。

**表A.5 振动试验曲线建立**

项目	文件	推荐的文件/参数	注解
	车辆描述	技术数据（即：功率、最大转速、标称转速、体积、发动机种类、气缸数）	
动力系统安装	边界条件	测力计和/或道路	满负荷 拖动油门条件时值更高
车身安装		试验场地/试验轨迹描述	-

		路面（即：比利时石块，搓板、减速坎）	-
		驾驶速度	-
车辆数据采集	采样速率	$\geq f_{\max}$ 的2.5倍	$f_{\max}$ 为评估的评估限制
	数据块长度, b	$\geq 2k$	-
	分辨率	LSB（最低的有效位）<最大值的0.1%	-
	滤波技术和方法	在 $f_{\max}$ 抗混淆滤波衰减率>48db/oct高通滤波（ $f_{\text{filter}} < f_{\text{min}}$ ）消除支流偏置	-
	发动机转速增加	发动机转速增加速率，例如3000 rpm/min	如果发动机转速增长过快，就有可能检测不到现有的共振
	频率分辨率, $\Delta f$	确保在提升发动机转速时，频率分辨率高于激励频率的差值。否则FFT值（快速傅里叶变换）将是错误的。 例如： $\Delta f=1\text{Hz}$ 是1s一次，但是对于一个斜坡，发动机转速1000r/min在1s内，4次扫频超过了1Hz	$\Delta f=f_{\text{sampling}}/b$ 例如：12500/2048=6.1Hz
温度	冷却水的温度，油的温度 样品温度（样品安装地点和区域）	发动机状态和样品状态描述（特别是弹性悬吊点）	
数据分析	峰值保持FFT	峰值保持	参照建立正弦试验或正弦加随机试验的正弦部分
	峰值保持和所有其他的范围	给出的信息：振幅值还是给出的RMS	-
	加窗	对稳态信号（不含瞬态信号）加汉宁（Hanning）窗	-
		对瞬态信号不加窗（峰值因子>6）	-
	关于速度/时间的r. m. s.	-	-
	信号特征（信号的正弦/随机部分）	具有最大r. m. s. 值的窗函数计算平均PSD	参照建立正弦试验或正弦加随机试验的随机部分
瀑布图		-	
稳态信号的自相关		-	
试验曲线建立	用于建立曲线的方法和过程	如：描述包括数据压缩（平均或取包络）在内的所有关键点	-
	用于确定试验持续时间的方法和过程	说明将试验应力和试验时间用于相关场合的应力和工作寿命的假设和模型。如基于最严酷材料的M值。	M值=S/N曲线的梯度。当按照A.6调整试验时间时，其值为5。 对于动力总成安装的部件，试验持续时间是根据A.4中所示的发动机速度分布计算。 对于车身安装的部件，试验持续时间根据A.5中的路面崎岖度百分比进行验证。
	动力系统上安装的部件	考虑发动机转速分布	-
	车身上安装的部件	考虑劣质路面条件的里程数	-

	过程和工程评价方法的基本原理	-	-
--	----------------	---	---

### A.3 平均控制方法

通常由于安装刚度和动态响应的不同，安装在车辆上与安装在振动台面上的DUT的频率响应有所不同。

为了能在试验室中再现振动试验，振动夹具应具有尽可能大的刚度，通常比装车条件大得多。应考虑到DUT在振动夹具上的各个安装点的运动是同向的，由于振动试验夹具比在车辆上的安装部位有更高的刚度，其在汽车里安装点的运动在特定的频率上可能不是同向的。

此外，在振动试验期间DUT的动态反馈（激励衰减）通过振动控制单元被最小化。

对于大/重的DUT在共振状态下，在振动台试验时类似的激励比在汽车里产生更大的响应峰值。

为避免过试验，可以采用 GB/T 2423.56中相关的平均控制方法。

注：执行平均控制方法有两种不同的方式（多点控制策略）：

——DUT的加权平均控制的激励和响应。

推荐方式：平均控制信号=（3×激励）+（1×DUT响应）。

——安装在DUT上的控制点信号在平均控制之外时，每个控制点信号均采用相同的因子进行加权。

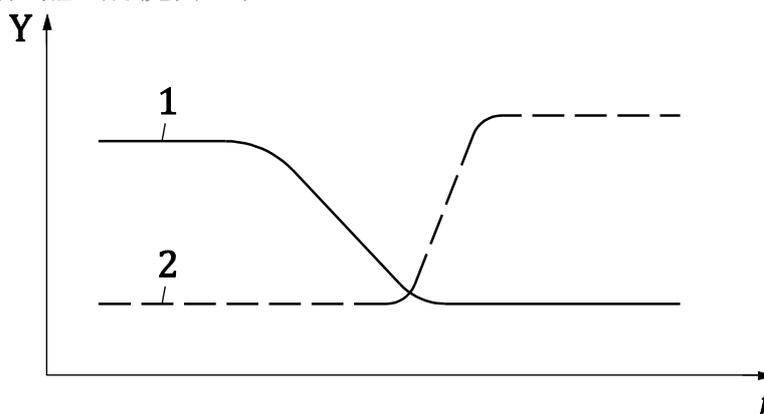
应确保DUT“经过充分试验”，试验室里的应力应足够大。（如通过测量DUT的响应和频谱比较或疲劳计算）。

### A.4 确定动力系统振动特性和试验持续时间的方法

#### A.4.1 概述

##### A.4.1.1 振动曲线

在GB/T 28046.3中，定义安装在发动机上/内部件的振动条件时，不仅考虑了发动机的振动，还考虑了路面的振动，其中发动机的振动是由于其高速转动引起的，路面振动是由于行驶在最恶劣的条件引起的。然而，包含这两种激励类型的振动条件对于本文件适用的部件来说过于严酷，于是采用一种新的顺序试验方法，由发动机高速行驶工况下覆盖发动机振动的正弦随机振动试验和低速行驶工况下覆盖道路振动的随机振动试验组成（见图A.1）。



说明：

Y ——PSD,  $(m/s^2)^2/Hz$ ;

f ——频率, Hz;

1 ——在崎岖不平的道路上低速行驶;

2 ——在平坦道路的上发动机高速运转。

图A.1 振动载荷和车辆速度

与GB/T 28046.3中的小传感器或ECU相比，由于DUT的质量和惯性增加，振动严酷程度低于GB/T 28046.3中的情况。

在GB/T 28046.3中，一个条件适用于所有轴(X轴、Y轴和Z轴)，包络每个轴上的测量负荷。在本文件中，对每个轴应使用不同的条件，因为动力总成部件通常安装在特定的位置和方向，每个轴向的振动可以是不同的。

#### A.4.1.2 试验时间

转速( $\text{min}^{-1}$ )与发动机转动引起的振动量级之间存在一定的关系。对于疲劳试验，只需考虑最大加速度量级的速度范围。根据插电式混合动力汽车(PHEV)的测量结果，发动机转速在 $0.9n_{\text{normal}}$ 到 $n_{\text{max}}$ 之间的累计停留时间是汽车整体寿命要求的0.55%。

根据以上结果，假设寿命为6000h，计算正弦随机振动试验中每个轴向的试验时间为33h，即以40公里/小时的平均车速可行驶240000公里。

由于道路振动通过安装减震垫对动力总成件进行衰减，在平路行驶时，振动的影响可以忽略，但在崎岖的路面行驶时，振动的影响需要考虑。考虑到粗糙路面的比例约为10%，随机振动试验时间为600h，即为寿命6000h的10%。然而，由于试验时间过长，通过以下步骤将试验时间从600h更改为10h。

#### A.4.1.3 以试验加速度为例，对振动条件进行调整

根据从600h到10h的试验时间变化，以Basquin模型为基础，采用以下公式对振动情况进行重新调整，称为加速疲劳试验等效损伤的理论方法。A.6中对模型作了一般性的说明。

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{m}}$$

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{m}}} = \frac{W_1}{\left(\frac{10}{600}\right)^{\frac{1}{5}}} = 2.3 \times W_1$$

说明：

- $W_1$  ——原路面行驶试验时间内的RMS量级；
- $W_2$  ——将试验时间调整为10h后的RMS量级；
- $T_1$  ——原路面行驶试验时长；
- $T_2$  ——调整后的试验时长；
- $m$  ——加速度系数。

### A.4.2 发动机转速分配负荷的验证

#### A.4.2.1 过程

如上文所述，考虑 $0.9 n_{\text{normal}}$  到 $n_{\text{max}}$ 范围内最高加速度量级的发动机振动负荷是足够的,可通过以下步骤验证：

- a) 记录实际工况中发动机转速分配情况(见 A.4.2.2.1)；
- b) 在底盘测功机上通过增加发动机转速测量加速度量级(见 A.4.2.2.2)；
- c) 根据时间内实测数据(循环计数法)确定负荷分布(见 A.4.2.2.3)；
- d) 分析分级的加速量级和发动机转速的循环次数(见 A.4.2.2.4)；
- e) 发动机转速范围内主导负荷的验证(见 A.4.2.2.5)。

A. 4. 2. 2 案例研究结果

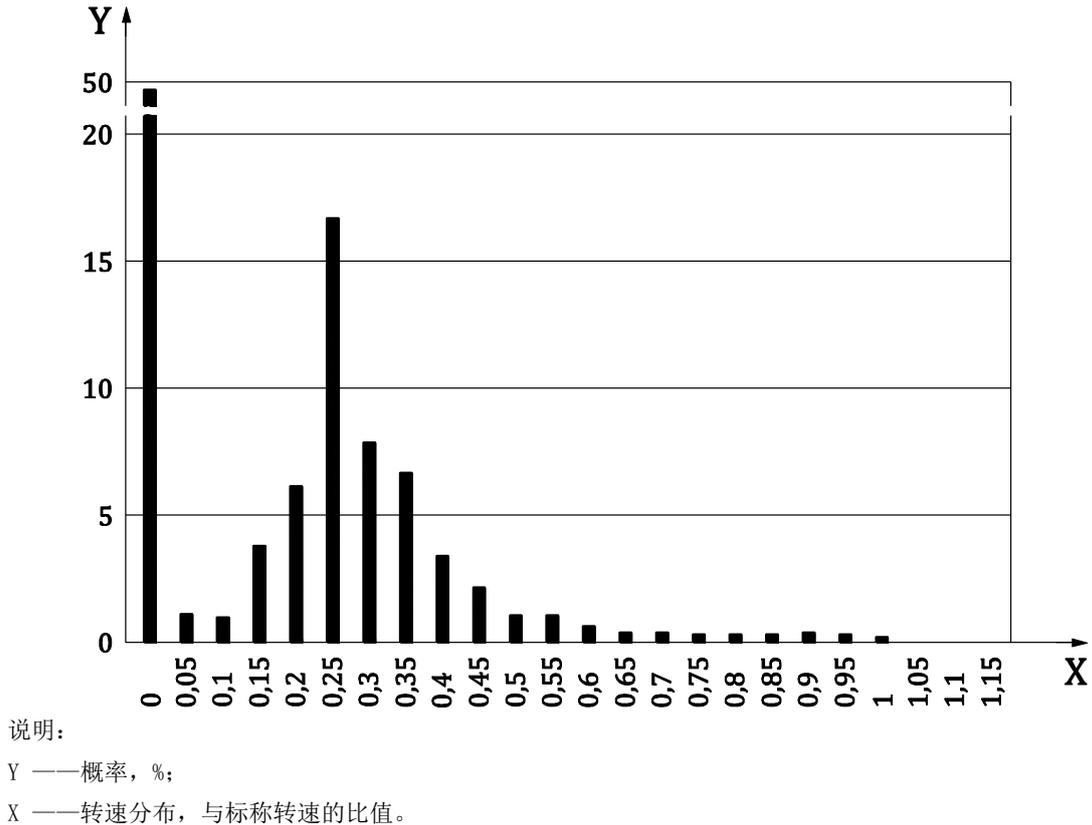
A. 4. 2. 2. 1 记录实际工况中发动机转速分配情况

以典型安装可提供35公里纯电动行驶里程高压电池的插电式混合动力汽车为例，选择一个发动机转速分布及不同类型道路混合使用分布，如市中心路(39%)，乡村路(44%)和高速公路(17%)。

由于车辆由纯电动驱动，内燃机完全关闭的时间较长。

除此之外，发动机转速分布与GB/T 28046.3—2011中A.4相似。使用同样的方法通过发动机最大功率时的转速确定标称转速。概率分布见图A.2和表A.6。

其中，在0.9倍标称转速以上的概率累计为0.55%，符合6000h的寿命要求33 h。



图A. 2 PHEV 发动机速度分布

表A. 6 发动机转速分布的概率和时间

转速分布 <i>n<sub>normal</sub></i>	概率 %	概率小计 %	时间 h	时间小计 h
0	48.862	99.45	2931.70	5967
0.05	0.899		53.97	
0.1	0.711		42.65	
0.15	3.705		222.32	
0.2	6.023		361.37	
0.25	16.614		996.83	
0.3	7.790		467.42	
0.35	6.524		391.44	
0.4	3.197		191.84	

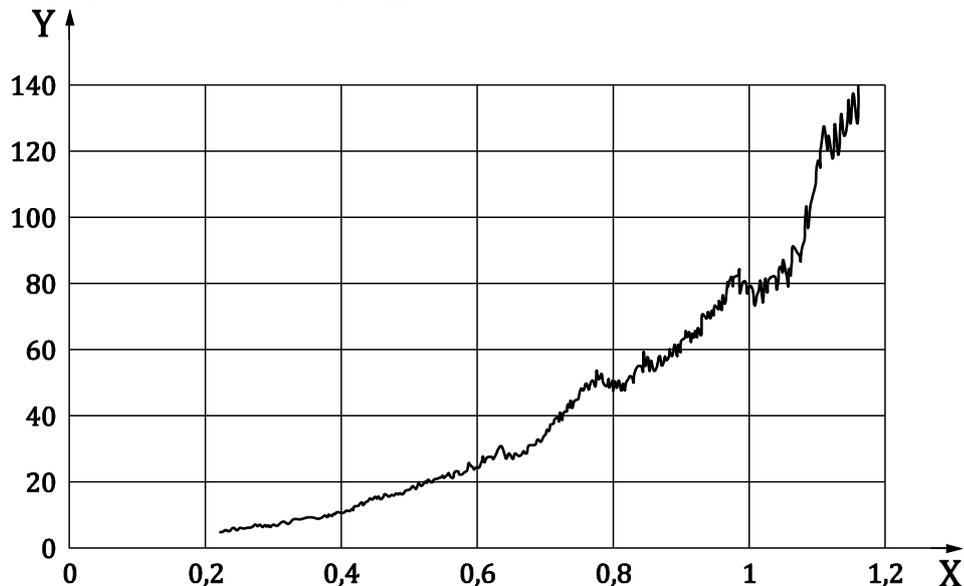
0.45	1.970		118.17	
0.5	0.922		55.33	
0.55	0.871		52.28	
0.6	0.457		27.41	
0.65	0.245		14.71	
0.7	0.200		12.03	
0.75	0.162		9.70	
0.8	0.148		8.86	
0.85	0.143		8.61	
0.9	0.199	0.55	11.97	33
0.95	0.178		10.66	
1	0.098		5.91	
1.05	0.057		3.44	
1.1	0.017		1.04	
1.15	0.004		0.21	

#### A. 4. 2. 2. 2 在底盘测功机上通过增加发动机转速测量加速度量级

动力系统上的加速度量级通过在底盘测功机上以恒定速率增加发动机的转速测量。图A.3所示的测量在以下条件进行：

- 标称转速：1，对应发动机最大功率时的转速，为5500rpm；
- 测量开始时的发动机转速：1217 rpm(0.221倍标称转速)；
- 测量结束时的发动机转速：6386 rpm(1.161倍标称转速)；
- 发动机转速提升速率：3000 rpm/min；
- 测量时间：1.723分钟[=(6386-1217)/3000]。

测量过程中，记录不同时间对应加速度量级。



说明：

Y ——加速度，m/s<sup>2</sup>；

X ——转速分布，与标称转速的比值。

图A. 3 动力系统的加速量级

#### A. 4. 2. 2. 3 根据时间内实测数据(循环计数法)确定负荷分布

两个加速度量级为零的点之间有一个最大值。

在每个加速度量级对测量时间内最大值的个数进行计数。

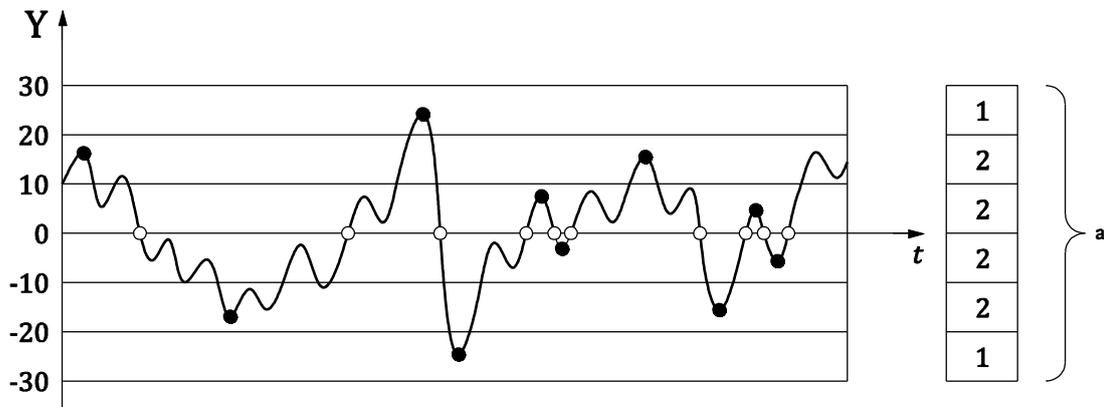
这种计数方法的结果给出了每个加速度量级半周期数值，即从时间内实测数据中得到的负荷分布。见图A.4。

试验时间负荷分布通过使用每个加速度量级的系数(试验时间/测量时间)计算。(例如,  $4.4\text{h} \times 3600\text{s/h}/19.9\text{s} = 796$ )

汽车寿命负荷分布通过使用每个加速度量级的系数(汽车寿命 $\times$ 粗糙道路的百分比/测量时间)计算。(例如 $6000\text{h} \times 0.5 \times 3600\text{s/h}/3.69\text{s} = 2926829$ )。

注：负荷分布取决于DUT上的测量点。

这种简单的方法仅适用于一种占主导位置的DUT共振模式。其他情况下，时间信号应在计数开始前准备好。例如，分别对DUT的每一个薄弱点进行过滤，如通过阶梯应力试验来发现薄弱点。



说明：

Y ——加速度量级， $\text{m/s}^2$ ；

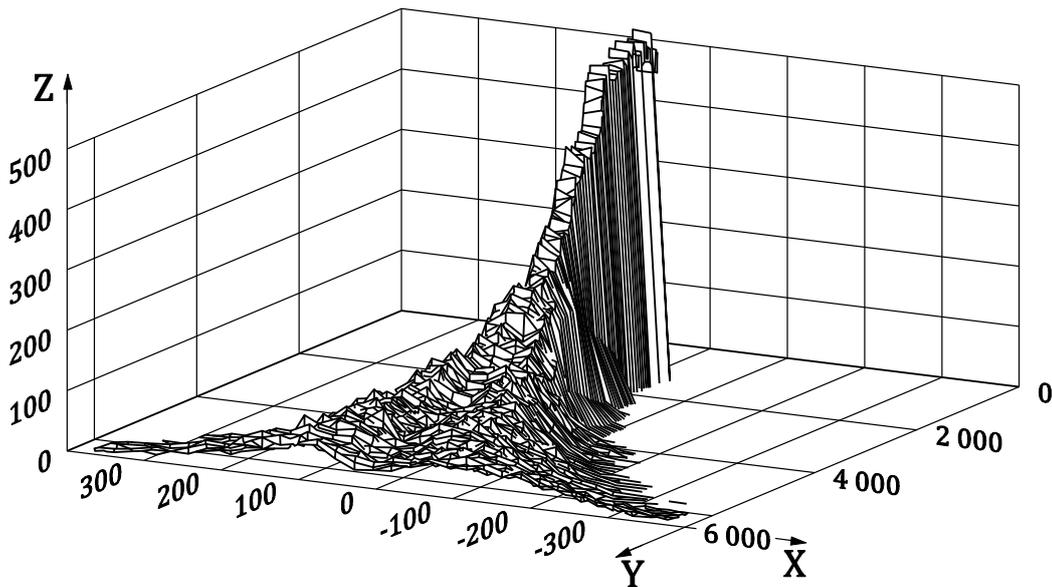
t ——时间，s；

a ——每个加速度量级半周期数值。

图A. 4 负荷分配的计算方法

#### A. 4. 2. 2. 4 分析分级的加速量级和发动机转速的循环次数

采用循环计数法(见A.4.2.2.3)，根据前一步的测量数据，分析各加速度量级和各发动机转速下的振动循环数，以0.05倍标称转速为一级，并将加速度量级被分为不同级别，得到各量级循环数见表A.15，循环数分布见图A.5。



说明:

X —— 加速度量级,  $\text{m/s}^2$ ;

Y —— 发动机转速,  $\text{min}^{-1}$ ;

Z —— 循环数。

图A.5 循环个数的分布

此外, 实际工况发动机转速分配情况由实际工况保持时间除以底盘测功机测量每一级发动机转速分布比值来估算。以1.15倍标称转速、加速度为 $371.2 \text{ m/s}^2$ 为例, 计算结果如下:

- 底盘测功机测量时间: 1.723分钟(见A.4.2.2.2);
- 0.05级每个发动机转速测量时间:  $0.091 \text{ min}(=1.723/19\text{级})$ ;
- 1.15倍标称转速的实际工况保持时间为:  $0.21 \text{ h}$ (见表A.6);
- 实际工况保持时间和测量时间之间的比值:  $139\text{倍}(=0.21 \times 60/0.091)$ ;
- 底盘测功机测得的循环次数: 23次(见表A.15);
- 实际工况循环数:  $3200\text{个循环}(\approx 23 \times 139)$ 。

上面的计算中标称转速分布分为19级。表A.15中的数量为24级, 但本次测量从0到0.15的4个级别没有循环, 其余20级在底盘测功机上测量0.2倍标称转速和1.15倍标称转速的起止数据不完整。因此, 使用19级而不是20级来计算。虽然省略了加速度小的低速范围量级, 但对最终计算结果影响不大。

所有类型的速度和加速度都采用相同的计算方法, 实际工况的循环数如表A.16所示。表中最后一行所示的每个加速度量级的循环数的总和用于下一个步骤的理论验证(例如, 加速度量级为 $371\text{m/s}^2$ 的循环数为105089)。

#### A. 4. 2. 2. 5 发动机转速范围内主导负荷的验证

使用Palmgren-Miner假设, 疲劳损伤S一般定义为无量纲量, 公式如下:

$$s_i = n_i/N_i$$

$$S = \sum s_i$$

说明:

$n_i$  —— 施加在加速度量级为 $a_i$ 的循环数,  $a_i$ 单位为 $\text{m/s}^2$ ;

$N_i$  —— 加速度量级为 $a_i$ 时出现故障(疲劳寿命)的循环次数;

$s_i$  —— 线性累积伤害;

i ——加速度量级后缀。

根据假设，当 $S$ 大于或等于1时，疲劳(最终断裂)发生。对于本次验证的后续过程，将实际工况中的疲劳寿命损伤分为以下两部分：

$$S = S_1 + S_2$$

说明：

$S_1$ ——停车至 $0.9n_{\text{normal}}$ 速度范围内的损伤；

$S_2$ —— $0.9n_{\text{normal}}$ 到 $n_{\text{max}}$ 速度范围内的损伤。

如果 $S_2$ 远大于 $S_1$ ，即 $S_2/S_1$ 的比值足够大，说明疲劳寿命损伤主要来源于高速范围。具体计算方法如下：

- 选择斜率为 $k$ 、疲劳循环次数为 $N_D$ 的S-N模型(见表A.12)；
- 设定疲劳极限 $a_D$ (见图A.6)；
- 计算在 $a_i$ 时到故障点 $N_i$ 的循环次数；
- 计算在 $a_i$ 时 $s_i = n_i/N_i$ ；
- 计算总数 $S = \sum s_i$ ；
- 重复从b)到e)的步骤，改变 $a_D$ 使 $S=1$ ，或尽可能接近；
- 计算 $S_1$ 、 $S_2$ 和 $S_2/S_1$ 在指定的 $a_D$ 下的值。

根据这些步骤计算的例子如表A.7所示，其中条件和结果为：

- $k = 3.5$ ，即 $2k - 1 = 6$ ；
- $N_D = 2\,000\,000$ ，
- $a_D = 270$  当规定  $S = 1$ 时，
- $S_1 = 0.0792$ ，
- $S_2 = 0.933$ ，
- $S = S_1 + S_2 = 1.01$
- $S_2/S_1 = 11.8$ ，为最终计算结果。

$S_2/S_1$ 的比值大说明在 $0.9n_{\text{normal}}$ 及以上高速范围内的损害为主，而在 $0.9n_{\text{normal}}$ 以下的损害可忽略不计。如A.4.1.2所述，试验时间为每轴向33h。

表A.7 累积损害间的对比

加速度量级 m/s <sup>2</sup>	循环次数			材料疲劳限制循环 (S-N)	累积损害		
	$S_1$	$S_2$	$S(= S_1 + S_2)$		$S_1$	$S_2$	$S(= S_1 + S_2)$
12.0	$5.17 \times 10^{10}$	$8.45 \times 10^7$	$5.18 \times 10^{10}$	$2.63 \times 10^{15}$	$1.97 \times 10^{-5}$	$3.22 \times 10^{-8}$	$1.97 \times 10^{-5}$
36.0	$2.48 \times 10^9$	$1.07 \times 10^8$	$2.58 \times 10^9$	$3.60 \times 10^{12}$	$6.87 \times 10^{-4}$	$2.96 \times 10^{-5}$	$7.17 \times 10^{-4}$
60.0	$4.21 \times 10^8$	$1.21 \times 10^8$	$5.41 \times 10^8$	$1.68 \times 10^{11}$	$2.50 \times 10^{-3}$	$7.17 \times 10^{-4}$	$3.22 \times 10^{-3}$
83.8	$1.33 \times 10^8$	$1.20 \times 10^8$	$2.53 \times 10^8$	$2.23 \times 10^{10}$	$5.96 \times 10^{-3}$	$5.35 \times 10^{-3}$	$1.13 \times 10^{-2}$
108	$5.20 \times 10^7$	$9.43 \times 10^7$	$1.46 \times 10^8$	$4.94 \times 10^9$	$1.05 \times 10^{-2}$	$1.91 \times 10^{-2}$	$2.96 \times 10^{-2}$
132	$1.99 \times 10^7$	$6.43 \times 10^7$	$8.43 \times 10^7$	$1.48 \times 10^9$	$1.34 \times 10^{-2}$	$4.34 \times 10^{-2}$	$5.68 \times 10^{-2}$
156	$7.58 \times 10^6$	$4.02 \times 10^7$	$4.78 \times 10^7$	$5.44 \times 10^8$	$1.39 \times 10^{-2}$	$7.39 \times 10^{-2}$	$8.78 \times 10^{-2}$
180	$2.57 \times 10^6$	$2.27 \times 10^7$	$2.53 \times 10^7$	$2.31 \times 10^8$	$1.11 \times 10^{-2}$	$9.86 \times 10^{-2}$	$1.10 \times 10^{-1}$
204	$8.16 \times 10^5$	$1.27 \times 10^7$	$1.35 \times 10^7$	$1.09 \times 10^8$	$7.50 \times 10^{-3}$	$1.17 \times 10^{-1}$	$1.24 \times 10^{-1}$
228	$3.67 \times 10^5$	$6.87 \times 10^6$	$7.24 \times 10^6$	$5.59 \times 10^7$	$6.57 \times 10^{-3}$	$1.23 \times 10^{-1}$	$1.30 \times 10^{-1}$
252	$1.39 \times 10^5$	$3.59 \times 10^6$	$3.73 \times 10^6$	$3.06 \times 10^7$	$4.53 \times 10^{-3}$	$1.17 \times 10^{-1}$	$1.22 \times 10^{-1}$
275	$3.48 \times 10^4$	$2.13 \times 10^6$	$2.17 \times 10^6$	$1.87 \times 10^7$	$1.87 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-1}$	$1.16 \times 10^{-1}$

299	$5.86 \times 10^3$	$1.17 \times 10^6$	$1.17 \times 10^6$	$1.39 \times 10^7$	$4.20 \times 10^{-4}$	$8.36 \times 10^{-2}$	$8.41 \times 10^{-2}$
323	$0.00 \times 10^0$	$5.90 \times 10^5$	$5.90 \times 10^5$	$1.06 \times 10^7$	$0.00 \times 10^0$	$5.54 \times 10^{-2}$	$5.54 \times 10^{-2}$
347	$0.00 \times 10^0$	$3.43 \times 10^5$	$3.43 \times 10^5$	$8.29 \times 10^6$	$0.00 \times 10^0$	$4.14 \times 10^{-2}$	$4.14 \times 10^{-2}$
371	$0.00 \times 10^0$	$2.44 \times 10^5$	$2.44 \times 10^5$	$6.56 \times 10^6$	$0.00 \times 10^0$	$3.72 \times 10^{-2}$	$3.72 \times 10^{-2}$
				总计	$7.92 \times 10^{-2}$	$9.33 \times 10^{-1}$	1.0

## A.5 测定车身振动曲线和试验时间的方法

### A.5.1 一般要求

#### A.5.1.1 振动曲线

GB/T 28046.3中，在崎岖道路行驶时的振动曲线代表了车身状况。纯电动汽车、混合动力汽车牵引用电气及电子部件的质量在几千克到几十千克之间，DUT的质量大、惯性大，加速均方根降低。

多数安装在车身上的部件通过安装支架安装在不同的位置和方向上；因此，通过对X、Y、Z的振动曲线进行包络来定义振动曲线。

#### A.5.1.2 试验时间

GB/T 28046.3中，试验时间为8h，其中90%的粗糙路面被描述为最坏的情况，而通常用小于50%的粗糙路来计算(见GB/T 28046.3-2011中A.5.3.2)。用于纯电动汽车、混合动力汽车牵引用电气及电子部件比GB/T 28046.3涉及的DUT更大、更重，因此90%的假设过于严酷，将粗糙路面的百分比降低到50%。

这里的试验时间为4.4 h(= 8 h × 50% / 90%)。然而，这些部件的热容很高，4.4h的时间不足以覆盖振动试验并行进行的一个温度循环。

因此，随机振动试验时间应被延长到20h，从而能够覆盖至少一个温度循环。

#### A.5.1.3 以试验加速度为例，对振动条件进行调整

根据试验时间从4.4h到20h的变化，利用Basquin模型对振动条件进行调整。详情见A.6。

$$W_2 = \frac{W_1}{\left(\frac{20}{4.4}\right)^{\frac{1}{5}}} = 0.74 \times W_1$$

说明：

$W_1$ ——原粗糙路面行驶4.4 h内的RMS量级；

$W_2$ ——试验时间调整为20 h后的RMS量级。

### A.5.2 使用疲劳计算验证缩短的试验时间

#### A.5.2.1 结论

将粗糙路面的比例改变为50%，4.4 h的随机振动试验足以覆盖汽车在使用寿命期间产生的应力。试验时间为4.4 h产生的应力(疲劳极限)大约是行驶条件下(在试验跑道上行驶3000h)应力的1.65倍(1.20 - 1.99)。因此4.4 h的试验时间是足够的。验证过程如下。

#### A.5.2.2 过程

本文件使用的数据来自GB/T 28046.3中的ECU，同样的方法也适用于本文件所涵盖的部件：

- 汽车在试验轨道(颠簸路面)和随机振动试验中至少有两个测量点，一个在安装位置(输入或激励)，一个在DUT上；

- b) 测量时间内采用循环计数法(见 A. 4. 2. 2. 3)确定负荷分布;
- c) 选择汽车寿命和“粗糙路面百分比”(汽车寿命为 6000 h, 粗糙路面百分比为 50%);
- d) 将各量级的计数结果与系数相乘, 计算负荷分布(见 A. 5. 2. 4):
- (试验时间/试验期间的测量时间),
  - (车辆使用寿命×粗糙路面百分比/车辆行驶期间的测量时间)。
- e) 使用 Haibach 修正, 疲劳极限对应的伤害值为 1。

这些计算基于Woehler曲线进行Haibach修正; 详情见A.5.2.5。

注1: 只考虑Haibach修正。

注2: 通过所选试验轨道与所选粗糙道路测量值的比较表明, 试验轨道比粗糙道路严酷程度更高。

#### A. 5. 2. 3 随机振动试验参数

- 试验设备: 电动振动台;
- 部件安装: 将 DUT 牢固固定在振动台上;
- 控制点: 振动台上;
- 方向: 垂直于印刷电路板(PCB);
- RMS 加速度量级:  $33 \text{ m/s}^2$ ;
- 试验谱: 见表 A. 8。

表A. 8 随机振动试验参数示例

频率 Hz	PSD ( $\text{m/s}^2$ ) <sup>2</sup> /Hz <sup>a</sup>
10	20
30	20
200	0.5
1000	0.1

<sup>a</sup> 所选谱密度与4.1.2.2.2.2规定的略有不同。

#### A. 5. 2. 4 随机振动试验和车辆行驶的加速度分布

基于A.4.2.2.3中的循环计数法, 计算随机振动试验和车辆行驶(50%粗糙路面)的加速度分布:

- 测量时间为 19.91 s, 进行 4.4 h (= 8 h×50% / 90%)随机振动试验的负荷分布(见表 A .9);
- 测量时间为 3.69 s, 在崎岖路面(路面颠簸, 50 km/h)行驶 3 000 h(汽车寿命为 6 000 h, 崎岖路面占比为 50%)的负荷分布(见表 A. 10)。

表A. 9 随机振动试验加速度分布(4.4 h)

加速度量级 $a_i$ $\text{m/s}^2$	循环数 $n_i$
403.4	3616
377.4	5223
351.3	10046
325.3	24109
299.3	57861
273.3	112909

247.2	241489
221.2	401088
195.2	644908
169.2	886398
143.1	1169273
117.1	1354509
91.09	1448131
65.06	1303077

表A.10 车辆行驶加速度分布(在崎岖路面行驶 3000 h)

加速度量级 $a_i$ m/s <sup>2</sup>	循环数 $n_i$
129.4	1464844
112.7	1464844
104.4	4394531
96.04	2929688
87.69	4394531
79.34	4394531
70.99	4394531
62.64	10253906
54.28	5859375
45.93	26367188
37.58	46875000
29.23	84960938
20.88	150878906
12.53	383789063

## A.5.2.5 随机试验与驾驶压力的比较验证

使用Haibach修正来比较随机振动试验和粗糙路面驾驶的应力。

疲劳损伤的计算方法与A.4.2.2.5相同，计算随机振动试验和车辆行驶的损伤，并进行比较。如果来自振动试验的所有12个 $a_D$ 值都高于来自驾驶车辆的值，该假设适用。

$a_D$ 值的计算方法与A.4.2.2.5中a)~f)的计算步骤相同。

分别对随机振动试验和行驶车辆按上述步骤进行计算。在4.4 h的随机振动试验中，采用 $N_D=2\ 000$ 和 $k=3.5$ 的Haibach修正， $S=1$ 时的计算结果如表A.11所示。

表A.11 使用 Haibach 修正计算疲劳限值

$a_i$ m/s <sup>2</sup>	$n_i$	$N_i^a$	$s_i^a$
403.4	3616	241482	0.015
377.4	5223	304897	0.017
351.3	10046	391820	0.026
325.3	24109	512821	0.047
299.3	57861	686415	0.084

273.3	112909	934455	0.120
247.2	241489	1340573	0.180
221.2	401088	1977936	0.203
195.2	644908	4155303	0.155
169.2	886398	9796691	0.090
143.1	1169273	26769716	0.044
117.1	1354509	89153868	0.015
91.09	1448131	402399420	0.004
65.06	1303077	3031078645	0.000
总计			1.000
注: $M = 2000000$ ; $k = 3.5$ ; $2k - 1 = 6$ 。			
<sup>a</sup> $a_D = 220.5 \text{ m/s}^2$ 。			

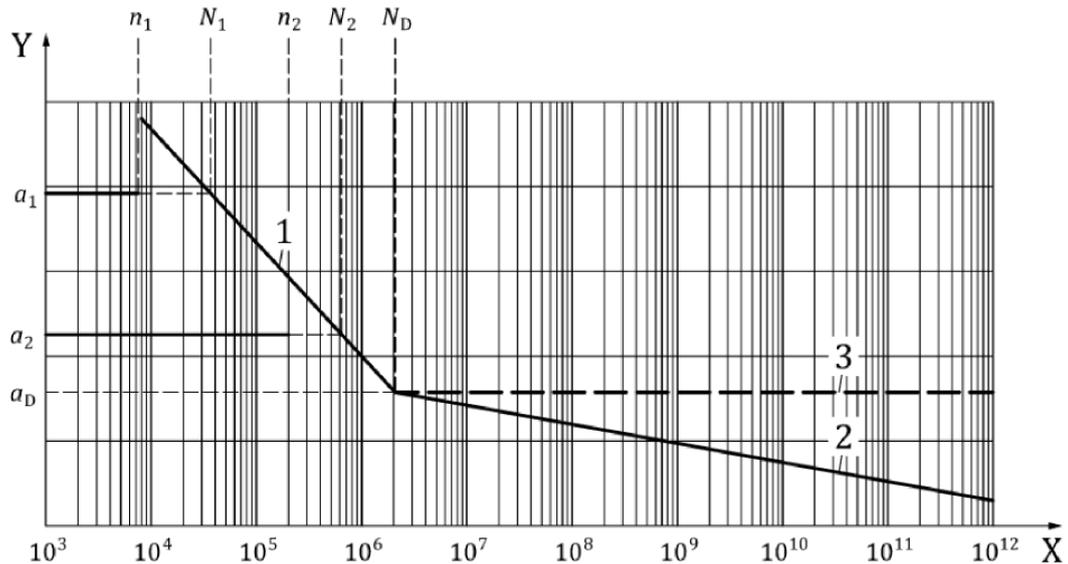
S-N模型是否符合实际基于广泛的调查和试验。因此,有必要对所有S-N参数全部覆盖(如特定的文献)。目前使用的12个模型如表A.12所示(“Haibach假设”、“4个斜率 $k$ ”和“3个疲劳极限循环 $N_D$ ”)。

注: Miner假设不适用,使用Haibach修正更合理。

其中部分模型与实际情况相差较多,其他的则更为接近实际情况。假设12个模型中至少有一个模型是比较接近实际情况。即使没有与实际情况接近的模型,对两种情况(车辆和试验)使用相同的模型或做出相同的假设,由于对错误假设进行补偿,对结果影响不大。

图A.6为所选实例负荷分布及对应的S/N图(一个模型)。图A.6疲劳损伤 $S$ 、疲劳极限 $a_D$ 、疲劳循环次数 $N_D$ 见A.4.2.2.5。

验证结果见表A.12,将路面粗糙比重从90%减少到50%,将随机振动试验时间改为4.4 h (= 8 h × 50% / 90%),随机振动试验比实测工况更为严酷。



说明:

- Y —— 加速度,  $\text{m/s}^2$ ;
- X —— 循环数;
- 1 —— 斜率,  $k$ ;
- 2 —— Haibach假设斜率,  $2k - 1$ ;
- 3 —— Miner假设;
- $a_D$  —— 疲劳极限,  $\text{m/s}^2$ ;

- $N_D$  ——疲劳循环数；  
 $a_1, a_2$  ——加速度量级， $m/s^2$ ；  
 $n_1, n_2$  ——加速度量级为 $a_1, a_2$ 时的循环数；  
 $N_1, N_2$  ——加速量级为 $a_1, a_2$ 时出现故障的循环数；

图A.6 线性损伤累积 S-N 图示例

表A.12 不同 S/N 模式疲劳计算的结果

S/N模型疲劳循环数 $N_D$	S/N模型斜率 $k$	假设	4.4h随机振动试验计算的疲劳等级(12个“S/N模型”) $m/s^2$	3000 h劣质道路行驶必需的疲劳等级(12个“S/N模型”) $m/s^2$	比较
2000000	3.5	Haibach	221	150	OK
	5	Haibach	224	135	OK
	7	Haibach	234	130	OK
	10	Haibach	253	127	OK
10000000	3.5	Haibach	148	113	OK
	5	Haibach	167	109	OK
	7	Haibach	189	109	OK
	10	Haibach	217	111	OK
50000000	3.5	Haibach	95	79	OK
	5	Haibach	122	83	OK
	7	Haibach	151	89	OK
	10	Haibach	185	96	OK

## A.6 对 Basquin 模型的解释

### A.6.1 范围

当由于夹具和/或DUT太重而不能达到试验条件的全部量级时，可通过调整振动负荷与试验时间的方式来补偿。

### A.6.2 概述

由振动应力引起的典型失效形式为疲劳损坏。疲劳时间与振动强度量级的关系可用式A.1计算：

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots (A.1)$$

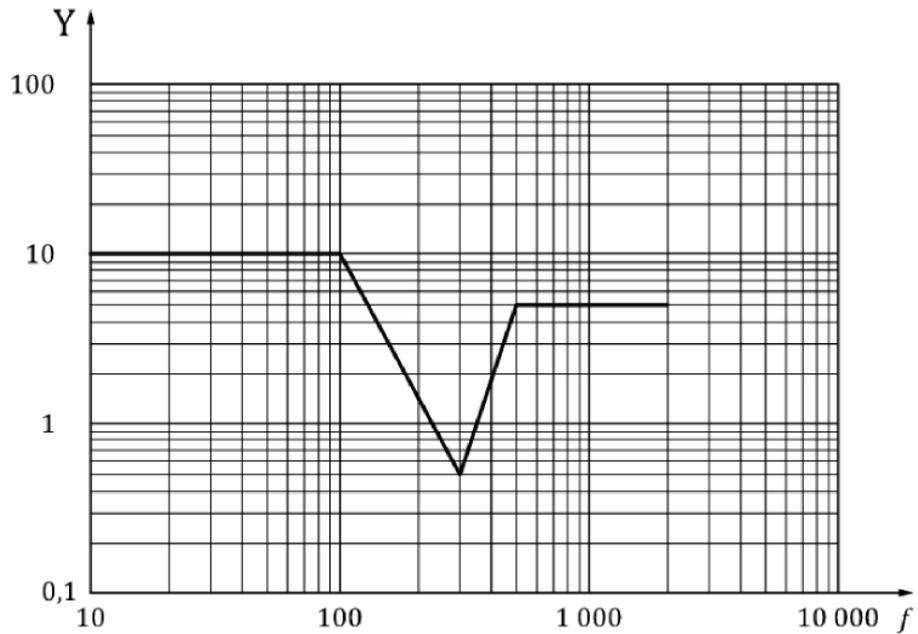
式中：

- $W_1$  ——振动加速度量级1；  
 $W_2$  ——振动加速度量级2；  
 $T_1$  ——耐久试验时间1；  
 $T_2$  ——耐久试验时间2；  
 $m$  ——加速度系数。

根据材料的不同， $m$ 有不同的数值(通常为3 ~ 9)，随机振动下金属的疲劳数值一般为 $m=4$ ，但是由于DUT是由不同的构件组成，所以采用 $m=5$ 计算。

### A.6.3 计算实例

当振动试验使用如下条件时(见图A.7和表A.13), 由于技术的限制, 不能全量级运行, 因此将每个轴向的试验时间调整为22 h。



说明:

Y —— PSD, (m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz;

f —— 频率, Hz。

图A.7 加速度与频率的原始 PSD

表A.13 PSD 值与频率

频率 Hz	PSD (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz
10	10.0
100	10.0
300	0.51
500	5.0
2000	5.0

例如, 使用公式A.1时, 曲线的RMS量级将降低50%(见图A.8和表A.14)。

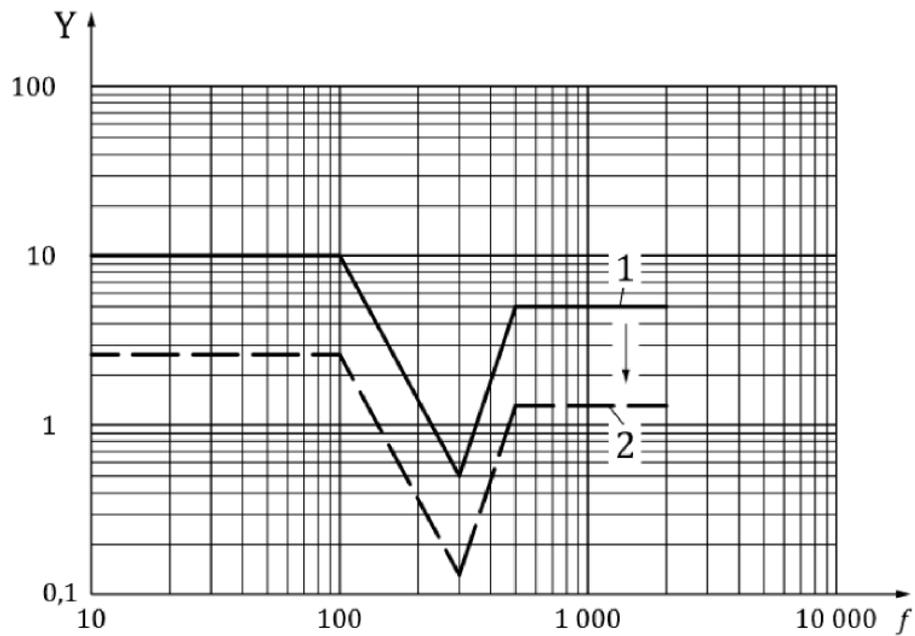
$$m = 5$$

$$W_1 = 96.6 \text{ m/s}^2 \text{ RMS}$$

$$W_2 = 48.3 \text{ m/s}^2 \text{ RMS}$$

$$T_1 = 22 \text{ h}$$

$$T_2 = 22 \times (96.6/48.3)^5 = 704 \text{ h}$$



说明:

Y —— PSD,  $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ ;

f —— 频率, Hz;

1 —— 试验时间为22 h时的原始PSD, RMS为96.6  $\text{m/s}^2$  ;

2 —— 试验时间为704 h计算得的PSD, RMS为48.3  $\text{m/s}^2$  。

图A. 8 加速度随频率计算得的 PSD

表A. 14 PSD 与频率

频率 Hz	给出的PSD $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$	计算得的PSD $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$
10	10.0	2.5
100	10.0	2.5
300	0.51	0.128
500	5.0	1.25
2000	5.0	1.25

#### A. 7 循环次数的测量数据

表A.15 底盘测功机测量的循环数

发动机转速分布 $n_{\text{normal}}$	加速度量级 $\text{m/s}^2$															
	371	347	323	299	275	251	228	204	180	156	132	108	84	60	36	12
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	10607
0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	13512
0.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	173	21342
0.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	349	15523
0.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	1586	14126
0.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	122	3319	13120
0.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	34	530	4841	10305
0.55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	126	1113	5207	8817
0.60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	56	367	1951	5577	6983
0.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	84	496	2166	5171	5961
0.70	0	0	0	0	0	0	0	3	14	45	148	468	1385	3007	4483	4505
0.75	0	0	0	0	0	8	10	14	41	154	357	956	2042	3452	3679	3154
0.80	0	0	0	1	3	9	21	31	57	167	401	913	1898	3303	3820	2891
0.85	0	0	0	0	0	5	13	50	131	318	703	1349	2403	3479	3423	2574
0.90	0	0	1	7	9	19	47	100	241	585	1144	2015	2900	3023	2698	2133
0.95	0	2	3	10	46	75	133	275	542	1030	1614	2424	2906	2818	2326	1901
1.00	5	3	9	14	19	66	118	282	517	904	1530	2205	2767	2768	2317	1660
1.05	18	32	56	82	120	207	363	539	883	1345	1851	2309	2516	2471	2118	1535
1.10	60	122	196	304	449	588	887	1139	1414	1743	1864	1979	1871	1584	1259	1017
1.15	23	24	70	100	126	171	252	231	331	359	410	395	403	322	247	197

表 A.15 底盘测功机测量的循环数 (续)

发动机转速分布 $n_{\text{normal}}$	加速度量级 $\text{m/s}^2$															
	-12	-36	-60	-84	-108	-132	-156	-180	-204	-228	-251	-275	-299	-323	-347	-371
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.20	10609	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.25	13534	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.30	21367	149	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.35	15497	372	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.40	14132	1589	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.45	13040	3376	146	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.50	10504	4677	496	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.55	8470	5795	926	78	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.60	7179	5693	1773	263	30	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.65	5746	5427	2128	503	73	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.70	4173	4661	3194	1401	477	112	31	8	1	0	0	0	0	0	0	0
0.75	3250	3484	3434	2174	986	367	127	35	6	3	1	0	0	0	0	0
0.80	2843	3421	3267	2222	1099	440	150	54	11	8	0	1	0	0	0	0
0.85	2556	3292	3381	2627	1529	681	261	89	22	7	0	2	0	0	0	0
0.90	2167	2708	2907	2835	2097	1211	599	249	101	37	9	2	1	0	0	0
0.95	2001	2443	2777	2774	2192	1649	1025	635	340	161	63	30	11	2	0	1
1.00	1947	2469	2579	2408	1932	1505	1060	611	344	161	78	50	27	9	6	1
1.05	1648	2037	2340	2442	2245	1810	1421	950	660	411	230	127	70	29	16	13
1.10	1262	1572	1719	1774	1803	1612	1599	1326	1089	877	563	480	309	191	133	137
1.15	271	296	361	344	359	365	313	337	280	238	173	130	81	46	39	31

表A.16 实际工况循环数

发动机转速分布 $n_{\text{normal}}$	加速度量级 $\text{m/s}^2$															
	371	347	323	299	275	251	228	204	180	156	132	108	84	60	36	12
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1434363	2535714445
0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20442827	8910434667
0.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53495093	6599377359
0.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90374624	4019728624
0.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5964898	201283581	1792769144
0.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	156354	9537623	259470241	1025685317
0.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	109808	1244493	19399445	177193799	377191096
0.55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	449613	4357790	38493811	180087398	304941096
0.60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	145074	1015519	6655273	35379939	101134763	126631531
0.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19467	77866	817597	4827713	21082312	50330857	58020159
0.70	0	0	0	0	0	0	0	23865	111372	357980	1177358	3722997	11017843	23921050	35662810	35837823
0.75	0	0	0	0	0	51313	64142	89798	262981	987783	2289860	6131951	13097745	22141731	23597749	20230307
0.80	0	0	0	5858	17574	52722	123018	181598	333906	978286	2349058	5348353	11118482	19348971	22377556	16935475
0.85	0	0	0	0	0	28479	74046	284794	746161	1811291	4004206	7683747	13687208	19815979	19497009	14661204
0.90	0	0	7915	55408	71239	150394	372028	791549	1907633	4630560	9055318	15949708	22954914	23928519	21355986	16883735
0.95	0	14103	21154	70513	324361	528849	937825	1939112	3821814	7262857	11380827	17092394	20491130	19870614	16401365	13404555
1.00	19546	11728	35183	54728	74274	258006	461283	1102388	2021045	3533897	5981042	8619737	10816695	10820604	9057565	6489235
1.05	40956	72811	127418	186577	273040	470993	825945	1226403	2009117	3060319	4211636	5253738	5724731	5622341	4819149	3492632
1.10	41383	84146	135186	209676	309686	405557	611784	785595	975268	1202187	1285644	1364962	1290472	1092521	868361	701448
1.15	3204	3343	9751	13930	17551	23820	35103	32178	46107	50008	57112	55022	56137	44854	34406	27442
总计	105089	186130	336607	596691	1087725	1970134	3505174	6457280	12235404	23894635	42015001	73615146	127496980	276465213	1288919504	25879157737

表A.16 实际工况循环数（续）

发动机转速分布 $n_{\text{normal}}$	加速度量级 $\text{m/s}^2$															
	-12	-36	-60	-84	-108	-132	-156	-180	-204	-228	-251	-275	-299	-323	-347	-371
0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.20	25361 92566	956242	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.25	89249 42480	593501 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.30	66071 07864	460738 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.35	40129 95844	963305 45	51790 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.40	17935 30621	201664 319	48226 84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.45	10194 31138	263926 344	11413 876	156354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.50	38447 5038	171190 951	18154 952	128109 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.55	29294 0324	200423 751	32026 297	269767 9	24209 9	34586	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.60	13018 5846	103238 337	32152 041	476931 0	54402 8	72537	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.65	55927 501	528225 80	20712 447	489584 6	71053 0	97333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.70	33196 722	370788 22	25408 658	111451 25	37945 93	890974	24660 9	63641	7955	0	0	0	0	0	0	0
0.75	20846 068	223469 85	22026 276	139444 16	63243 76	235400 2	81460 0	224496	38485	19243	6414	0	0	0	0	0
0.80	16654 291	200402 15	19138 083	130164 74	64379 41	257752 0	87870 0	316332	64438	46864	0	5858	0	0	0	0
0.85	14588 678	187508 49	19257 782	149630 86	87090 06	387889 7	14866 26	506934	12530 9	39871	0	11392	0	0	0	0
0.90	17152 862	214351 41	23010 323	224404 08	16598 778	958565 6	47413 77	197095 6	79946 4	292873	71239	15831	7915	0	0	0
0.95	14109 687	172263 70	19581 510	195603 56	15456 489	116276 23	72276 01	447758 7	23974 48	113526 2	44423 3	211540	77564	14103	0	7051
1.00	76111 69	965176 0	10081 770	941330 0	75525 32	588331 3	41437 29	238850 8	13447 57	629378	30491 6	195459	10554 8	35183	23455	3909
1.05	37497 44	463484 8	53242 73	555635 6	51081 16	411834 8	32332 44	216156 4	15017 18	935161	52332 6	288967	15927 3	65985	36405	29579
1.10	87043 0	108424 5	11856 34	122356 9	12435 71	111183 4	11028 67	914573	75110 8	604887	38831 4	331067	21312 4	131737	91733	94492
1.15	37750	41232	50286	47918	50008	50834	43600	46943	39003	33153	24098	18109	11283	6408	5433	4318
总计	25886 51662 3	129485 2357	26486 4799	125111 294	72772 066	422834 64	23918 952	130715 33	70696 87	373669 1	17625 41	107822 2	57470 8	253415	15702 6	13935 0

## 附录 B

(资料性)

## 按设备安装位置推荐的机械要求

表B.1给出了根据设备安装位置推荐的机械要求。

表B.1 安装位置

安装位置	推荐的试验和要求(代码见表8)乘用车
动力系统	
车身	C,D
车架	C,D
非刚性连接的柔性进气管上	Z
非刚性连接的柔性进气管内	Z
发动机上	A
发动机内	A
变速器/减速器上	B
变速器/减速器内	B
电机上	E,F
电机内	E,F
乘客舱	
无特殊要求	C,D
太阳直射出	C,D
热辐射处	C,D
行李舱/货舱	
舱内	C,D
外部/腔体内	
车身	C,D
车架	C,D
底盘/轮毂	
簧上	C,D
簧下	Z
乘客舱车门内/上	C,D
发动机舱盖	C,D
行李舱盖/门	C,D
箱体盖/门	C,D
腔体内	
开口向车内方向	C,D
开口向车外方向	C,D
专用舱内	C,D

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 2423.10—2019 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）（IEC 60068-2-6：2007，IDT）
- [2] GB/T 28046.3 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
-