

DOI: 10.3901/JME.2014.20.143

# 关联用户的汽车传动系载荷谱室内台架试验编制方法

李文礼<sup>1,2</sup> 石晓辉<sup>2</sup> 柯坚<sup>1</sup> 施全<sup>2</sup> 邹喜红<sup>2</sup> 余勇<sup>3</sup> 易鹏<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 重庆理工大学汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室 重庆 400054;

3. 重庆市科学技术研究院重庆轨道交通及汽车(摩托车)零部件研究中心 重庆 400054)

**摘要:** 为了编制汽车传动系室内台架耐久试验载荷, 实车采集用户行驶载荷数据, 采用雨流计数法和数理统计方法对测得的载荷数据进行压缩处理, 在重构的载荷谱中找到不同转矩载荷等级所对应的转速和挡位信息, 把传统的载荷-时间频次关系, 转变为载荷-发动机飞轮旋转频次关系, 同时记录各载荷等级对应的各个挡位的频次, 获得基于不同载荷等级下转速和挡位的统计分布。利用门限峰值理论载荷外推方法获得包含转速和挡位信息的传动系时域外推载荷谱, 运用重新定义采样率和样条插补方法对随机载荷进行处理, 获得适合台架试验使用的随机载荷谱。把用户使用的实车工况数据与台架试验结合起来, 避免了试验的盲目性, 为准确评价汽车传动系零部件的可靠性和制定科学的室内台架试验规范提供依据。

**关键词:** 载荷谱; 传动系; 台架试验; 时域外推

**中图分类号:** U467

## Weave Method Study of Customer Correlated Load Spectrum for Driveline Durability Indoor Test

LI Wenli<sup>1,2</sup> SHI Xiaohui<sup>2</sup> KE Jian<sup>1</sup> SHI Quan<sup>2</sup> ZOU Xihong<sup>2</sup> YU Yong<sup>3</sup> YI Peng<sup>3</sup>

(1. Mechanical Engineering College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Test Technology for Automobile Parts of Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054;

3. Research Center for Rail Transit &amp; Automobile(Motorcycle)Part, Chongqing Academy of Science and Technology, Chongqing 400054)

**Abstract:** In order to research the fatigue reliability of the vehicle powertrain system, a new load spectrum weave technique correlated customer usage is proposed based on automotive powertrain indoor test. It includes the compressive approach to random load time history based on rain-flow counting method and statistical theory, the speed and gear information corresponding the compression load are also received in the reconstruction spectrum. The traditional relationship between torque level and time is translated into torque level and speed range, meanwhile, the gear position is recorded. The statistical distribution based on different levels of Torque vs speed and vs gear are obtained. Using peak over threshold statistical extreme value theory, a method for extrapolation in the time domain is presented, the extrapolated load spectrum obtained from the extrapolated time signal contains the information about speed and gear. Defining new sampling rate and spline interpolation methods are used to modify the random load spectrum to the test rig properties. The technique can combine the real customer usage data to vehicle powertrain test bench, and avoid the test blindness. Provided an important foundation for precisely evaluating automotive powertrain reliability and establishing a reasonable principle of automotive powertrain reliability indoor test.

**Key words:** load spectrum; driveline; test bench; time-domain extrapolation

## 0 前言

汽车传动系可靠性试验是考核和验证传动系

耐久性的一种重要手段。如何进行合理的、符合用户使用条件的传动系可靠性试验是汽车传动系零部件行业面临的一个重要课题。汽车传动系中的零部件处于复杂的随机变载荷工作状态, 汽车传动系(括离合器、变速器、传动轴)零部件较多, 它们之间通

过各种形式的连接构成了力学特性较为复杂的传动链。汽车在行驶过程中传动系不仅受到来自发动机的周期性激励,还受到各种路面的随机激励和汽车起步、换挡、制动、加减速等工况对其的冲击力以及其内部总成的各种激励<sup>[4]</sup>。由于汽车传动系可靠性试验的复杂性,传统的室内台架试验多以强度试验为主,依据习惯或经验对传动系零部件进行加载,而没有合理地考虑用户的使用情况。有些试验结果与用户实际失效模式差别较大。因此迫切需要研究制订与用户使用条件相关的汽车传动系室内台架可靠性试验方法。

目前对车辆承载构件的可靠性试验研究文献较多<sup>[1-3]</sup>,而对传动系可靠性试验特别是基于室内台架试验评价方法和载荷谱编制方法的研究文献相对较少<sup>[4-5]</sup>。高云凯等<sup>[1]</sup>介绍了一种能简化加速车身台架疲劳试验的程序载荷谱编谱方法,在试验过程中获得了很好的效果。陈欣等<sup>[4]</sup>介绍了车辆传动系的二维程序载荷谱的编制方法。门玉琢等<sup>[5]</sup>为研究某重型载货汽车承载构件的疲劳可靠性,提出了基于汽车试验场和用户用途相关联的汽车可靠性试验方法,该方法可把用户对车辆的实际使用工况与试验场强化试验结合起来,可避免试验盲目性。

本文使用用户实测传动系载荷谱数据,以疲劳累积损伤理论为基础,应用雨流计数方法对原始载荷进行压缩处理,利用统计极值理论对压缩后的载荷进行时域外推,得到传动系全寿命时域重构载荷谱,为室内台架试验载荷谱的编制和加载方法的制定提供依据。

## 1 用户关联载荷谱方法

根据结构疲劳理论,汽车传动系部件的疲劳损伤主要是由循环载荷引起的,若汽车的输入载荷相同,那么它所引起的疲劳损伤理论上也应相同,汽车各部位所承受的载荷基本上与汽车的输入载荷信号成比例<sup>[5]</sup>。基于这一原理,如果已知用户实际使用环境中汽车的载荷输入,就可以在室内台架上通过驱动电动机或测功机对传动系部件施以一定的转速和转矩重现这一载荷输入。由于载荷重现通常可在较短的时间内完成,因此可以达到试验加速的目的。

对用户使用汽车产品的整个过程进行调查,一般情况下,可靠性试验规范应按 B5 至 B10 的用户使用目标里程来制定<sup>[5]</sup>。这些信息可以通过市场调研、用户回访、质量功能展开报告、售后服务、用户保险信息来获得。通过以上调研可以获得的信息

包括:① 用户目标里程百分比;② 不同路面条件下的典型车速;③ 载荷量;④ 汽车行驶的地理区域信息,如地形、路面坡度以及行驶条件;⑤ 每日或者每月行驶的里程或时间。对调查获得的资料信息进行加工处理获得和用户使用条件相关的室内台架试验规范,图 1 说明了关联用户的载荷谱室内台架试验处理方法和流程。

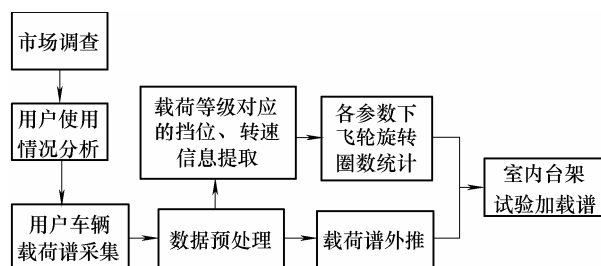


图 1 传动系室内台架试验总体流程

## 2 数据采集与处理

### 2.1 用户道路载荷谱数据拾取

由于道路试验测中的路面构成复杂,工况较多,振动也较大,因此测试的设备应具有良好的抗振性能,能有效应对恶劣的测试环境;应具有良好的动态性能,实时采集和显示实际载荷信号。本文使用 IMC 公司的 imc-C 系列多功能数采系统,信号采集及传感器布置如图 2 所示。

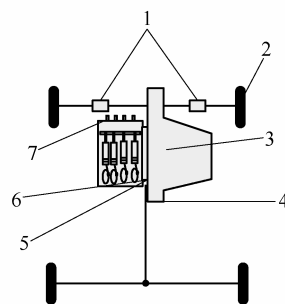


图 2 传感器布总体置图

1. 左右半轴转矩信号 2. 车速信号 3. 挡位信号 4. 温度信号
5. 加速踏板信号 6. 离合器分离信号 7. 发动机转速信号

转矩信号利用在变速器的两个输出半轴上粘贴全桥式应变片的方法获得,射频(Radio frequency, RF)遥测系统把采集到的应变信号通过无线传输的方式发送到采集器(图 3),采集器接收到信号后经过标定转换即获得转矩信号。变速器输入转速由安装在发动机飞轮上的转速传感器测得(图 4),离合器行程和节气门开度信号则是通过在其相应的踏板安装位移传感器获得,温度传感器安装在变速器油底壳上,挡位信息通过位移传感器测取变速杆位移来获得(图 5)。

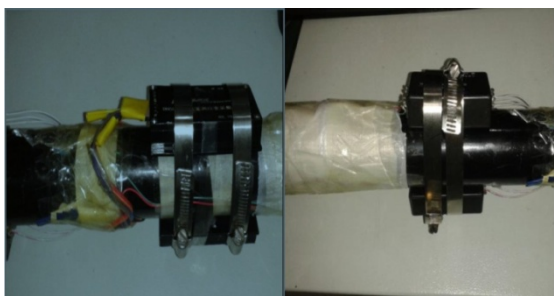


图3 半轴转矩信号测量



图4 发动机转速信号测量



图5 挡位信号测量

对于用户实际使用条件下的标准载荷谱, 国外较多采用的有代表性的用户使用路面是按好、中、坏路面分别占 80%、16%、4%的比例合成的综合路面。考虑到中国道路条件和车辆使用的实际, 本文选取的用户使用路面合成比例分别如下: 高速路(50%)、城区路(30)、乡村路(15%)、山区路(5%)。对采集处理后的数据按里程叠加, 得到设计目标里程所需要的载荷谱。

## 2.2 数据处理

车辆传动系载荷谱的采集, 是使整车按预先规定的条件驾驶, 实时采集有关数据, 然后进行统计处理。车辆行驶载荷的产生由两部分构成<sup>[7]</sup>, 一为车辆的加速、减速、转向、制动等, 这部分行驶载荷可以称为由驾驶习惯引起的, 其信号频率一般在 0.65 Hz 以下, 属于低频信号。二为道路条件、铺装程度、管理情况引起的, 可称为由道路条件引起的, 其信号频率一般在 0.65 Hz 以上, 属于高频信号。

对载荷-时间历程的处理主要有两种方法, 一种是功率谱方法, 另一种是计数方法。功率谱方法主要是通过快速傅里叶变换得到载荷的功率谱密度函数, 通过该函数的各次矩求得载荷的分布特性及相关参数, 利用疲劳损伤理论进行疲劳损伤和寿命计

算。计数法的基本原理是将载荷-时间历程简化为一系列全循环或半循环并累积出现的频次。计数法最大的优点是大大减少了数据量, 便于以后的疲劳计算。

### 2.2.1 伪读数的去除

采集到的原始信号中通常会带有不同种类的噪声(如工频噪声等), 通常这些噪声的频带都比较宽, 而且很多时候其高频成分还占据较大的比例, 因此这也使得经离散后的数据呈现一系列的尖峰, 这些信号不能真实反映零部件受载后的幅值大小, 本文采用幅值法对原始信号作峰值检测消除这类噪声的影响。

### 2.2.2 挡位信号提取

挡位信号可以由发动机转速信号和车轮 ABS 系统获得的车速信号通过计算获得。本文为了测试更加准确, 在驾驶室变速杆上安装位移传感器(图 5), 把采集获得的纵横坐标的变速杆位移结合离合器分离信号与各挡位对应的位移进行比对, 从而获得挡位信号的时间历程。

### 2.2.3 发动机转矩获得

由于分别对变速器左右半轴进行载荷统计和分析较为复杂, 且室内台架试验习惯上更关注传动系输入端转矩, 即发动机转矩信息, 本文把采集获得的变速器左右半轴的载荷数据通过其对应的挡位信息计算转化为发动机转矩载荷时间历程。

### 2.2.4 平稳性检验

在对实测载荷进行统计处理的前提是载荷随机过程必须是平稳的且各态历经的随机过程。因此对所测取的信号要做平稳性检验和各态历经性检验。根据经验, 一般工程上所遇到的平稳随机信号, 都可以看成各态历经的, 所以只需要对信号进行平稳性检验。本文采用轮次检验法验证了所采集载荷谱通过平稳性检验<sup>[7]</sup>。

### 2.2.5 峰谷值检测

峰谷值检测是指把经过去除伪数和滤波等预处理后的离散数字序列中所有峰值和谷值全部检测出来, 按先后顺序组成新的数字序列。实际上是把所采集的数据每个循环中组成相同斜率的最高点和组成相反斜率的最低点保留下来, 其余值全部移除的过程。

### 2.2.6 无效幅值的省略

在实际工作中结构零部件除了受主要的工作载荷外, 还常常受到一些次要的或意外的载荷作用, 这些载荷表现为二级波, 三级波乃至一些不能造成疲劳损伤的高阶小量循环。无效幅值是影响缩短试验时间的一个重要因素, 文献[8]给出了如式(1)所示的无效幅值的省略基准

$$\Delta S_A = (X_{\max} - X_{\min}) \Delta \times 100\% \quad (1)$$

式中  $\Delta S_A$ ——省略无效幅值的大小;

$X_{\min}$ ——随机载荷波形中的最小值;

$\Delta$ ——任意给定的数值, 本文取  $\Delta=20$ 。

由于本文讨论的载荷谱编制方法是针对汽车传动系, 其工况测试不仅与转矩载荷有关, 转速和挡位信息对其疲劳损伤也有重要影响, 因此在对载荷进行峰谷值检测和无效幅值去除处理过程中, 在提取转矩信息的同时把其时间位置信息记录下来, 并用此时间位置信息去提取对应的转速和挡位信息(图 7), 然后再进行雨流计数处理。由图 6 和图 7 对比可以看出, 进行峰谷值检测和无效幅值去除之后载荷谱的数据点数由 1 600 s 下降到 255 s, 时间大大缩短。

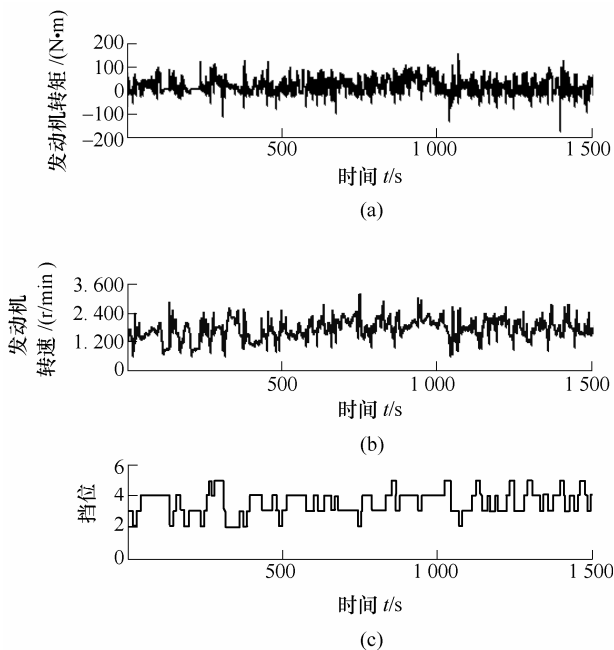


图 6 原始载荷谱

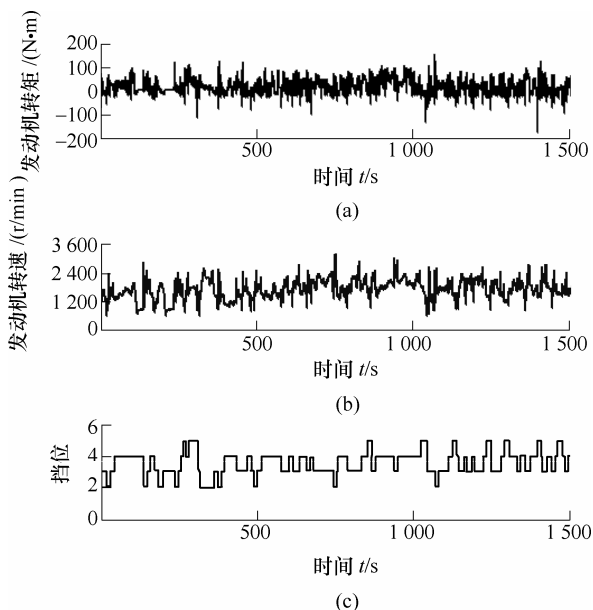


图 7 雨流法压缩后载荷谱

### 3 疲劳载荷的统计和分析方法

#### 3.1 疲劳累积损伤理论

根据材料的疲劳寿命  $S-N$  曲线, 若设  $S_i$  为某挡位下第  $i$  级应力的载荷水平,  $n_i$  为此对应应力水平下的载荷的循环次数, 则  $S_i$  级应力所对应的疲劳寿命为  $N_i$ , 可得  $S_i$  级应力的疲劳损伤量

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

基于上述原理, 若设  $T_k$  为某挡位下的一个参考载荷水平,  $n_k$  为在此载荷水平下的发动机旋转圈数, 其对应的疲劳寿命为  $N_k$ , 由 Miner 法则和等量累积损伤原理可得

$$D_k = \frac{n_k}{N_k} \quad (3)$$

同理可得总的疲劳损伤量

$$D = \sum_{j=1}^g \sum_{k=1}^l \frac{n_k}{N_k} \quad (4)$$

式中  $g$ ——传动系挡位数;

$l$ ——某挡位下载荷水平等级数;

$n_k$ ——某挡下第  $k$  级水平  $T_k$  对应的飞轮旋转圈数;

$N_k$ ——某挡位下第  $k$  级水平  $T_k$  对应的疲劳寿命。

当总的累积损伤达到其损伤临界值时, 零件就会发生疲劳破坏。

#### 3.2 转矩载荷分级处理

把正拖和反拖工况下的转矩各分为 8 级, 取载荷谱中  $10^6$  次出现一次的幅值作为最大载荷幅值。以正拖转矩为例, 经过统计获得载荷的最大值为 255 N·m。各级载荷幅值与最大幅值之比依次为 1.000、0.950、0.850、0.725、0.575、0.425、0.275、0.125。本文为了便于统计和观察取其稍大的整数分别为 255 N·m、242 N·m、216 N·m、185 N·m、150 N·m、110 N·m、70 N·m、35 N·m。以各级载荷幅值为中心进行载荷等级划分, 即可获得载荷等级范围, 对载荷谱数据统计观察发现最大值幅值附近载荷极少, 因此本文把较大的三个载荷等级归化为一个等级, 最终确定的载荷等级如表 1 所示。

#### 3.3 转矩、转速和挡位信号联合统计分析

雨流计数通常是根据载荷历程得到全部的载荷循环, 分别计算出循环的幅值, 并根据这些幅值得到不同幅值区间内所具有的频次。如果把这种方法直接用于传动系载荷谱处理, 则会丢失转矩载荷

表 1 不同转速区间内各载荷等级对应的飞轮旋转圈数统计表

| 发动机转矩/(N·m) | 发动机转速/(r/min) |             |             |             |             |             |
|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|             | 700~1 000     | 1 000~1 800 | 1 800~2 500 | 2 500~3 300 | 3 300~4 500 | 4 500~5 500 |
| 203~255     | 0             | 302         | 58          | 0           | 0           | 0           |
| 168~203     | 5 381         | 41 464      | 35 434      | 54 562      | 15 284      | 48 542      |
| 130~168     | 84 489        | 313 564     | 5 145 343   | 343 534     | 812 211     | 153 453     |
| 90~130      | 1 138 378     | 1 852 734   | 1 177 514   | 822 141     | 1 422 741   | 3 142 425   |
| 50~90       | 2 519 085     | 3 885 762   | 46 453 435  | 3 345 348   | 41 245 323  | 1 058 364   |
| 50~0        | 2 817 736     | 1 822 454   | 45 368 241  | 2 538 156   | 14 124 253  | 840 214     |
| -50~0       | 2 286 835     | 1 573 489   | 24 634 657  | 3 545 571   | 13 012 783  | 783 925     |
| -90~-50     | 519 863       | 154 878     | 1 753 846   | 113 558     | 142 887     | 34 421      |
| -130~-90    | 32 586        | 34 533      | 644 575     | 45 874      | 35 788      | 7 425       |
| -168~-130   | 8 243         | 7 643       | 7 553       | 815         | 648         | 127         |
| -203~-168   | 0             | 0           | 317         | 425         | 220         | 0           |

对应的转速和挡位信息，因此本文在进行雨流计数前先确定转矩载荷等级，然后在重构的载荷谱中找到不同转矩载荷等级所对应的转速和挡位信息，把传统的载荷-时间的频次关系，转变为载荷-发动机飞轮旋转圈数的频次关系，同时记录各载荷等级对应的各个挡位的频次(图 8)，通过提取载荷等级  $T_k$  对应的发动机转速、挡位和时间  $\Delta t$  来计算载荷等级  $T_k$  所对应的发动机飞轮旋转频次和挡位出现频次。表 1 和表 2 分别为各转矩载荷等级下不同转速和挡位对应的飞轮旋转圈数，其直方图分别如图 9 和图 10

所示。

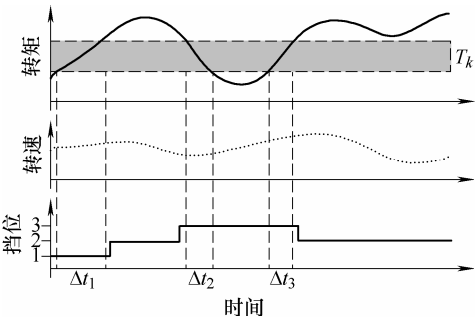


图 8 载荷等级  $T_k$  对应的转速和挡位

表 2 不同挡位下各载荷等级对应的飞轮旋转圈数统计表

| 发动机转矩/(N·m) | 挡位      |           |            |            |            |
|-------------|---------|-----------|------------|------------|------------|
|             | 1       | 2         | 3          | 4          | 5          |
| 203~255     | 0       | 262       | 98         | 0          | 0          |
| 168~203     | 9 899   | 26 534    | 41 877     | 44 847     | 77 457     |
| 130~168     | 138 522 | 1 105 431 | 1 167 882  | 2 178 038  | 2 309 455  |
| 90~130      | 127 376 | 1 859 735 | 2 248 513  | 2 492 142  | 2 832 740  |
| 50~90       | 579 081 | 3 825 768 | 27 453 431 | 32 375 345 | 34 265 327 |
| 50~0        | 817 734 | 1 422 476 | 13 338 267 | 24 918 123 | 27 024 284 |
| -50~0       | 623 835 | 973 489   | 11 534 657 | 14 545 571 | 18 012 783 |
| -90~-50     | 919 863 | 654 878   | 753 846    | 213 558    | 142 887    |
| -130~-90    | 232 742 | 114 374   | 114 447    | 312 763    | 25 985     |
| -168~-130   | 9 246   | 8 640     | 4 351      | 1 817      | 849        |
| -203~-168   | 0       | 0         | 216        | 385        | 421        |

3.4 载荷谱时域外推方法

关联用户的载荷谱获得，可以采集整个使用寿命过程中的数据，但是很多情况下为了缩短开发时间和测试成本，载荷时间历程只能实现相对短时间内的测量，然后采用外推来获得全寿命载荷谱预测。合适的外推方法能够实现对总体样本载荷的准确估计，获得等效的疲劳损伤载荷谱，而且可以估计出实际路谱采集过程中没有测到的大载荷，本文使用时域方法<sup>[9-10]</sup>对经雨流方法压缩处理后的载荷谱进行外推。时域外推是将测试信号通过过滤直接外推

得到所需里程的时间历程。这种方法适用于时域信号重构，进而应用得到的时域重构信号进行疲劳测试。

3.4.1 门限峰值极值理论

本文使用的时域外推方法基于统计学方法中的一元极值理论，其模型主要由广义极值分布 (Generalized extreme value distribution, GEV)和广义 Parto 分布 (Generalized Pareto distribution, GPD)，是基于不同样本选取方法而得到的渐近分布，主要用于描述分布的尾部特征，即超越阈值的分布。经典

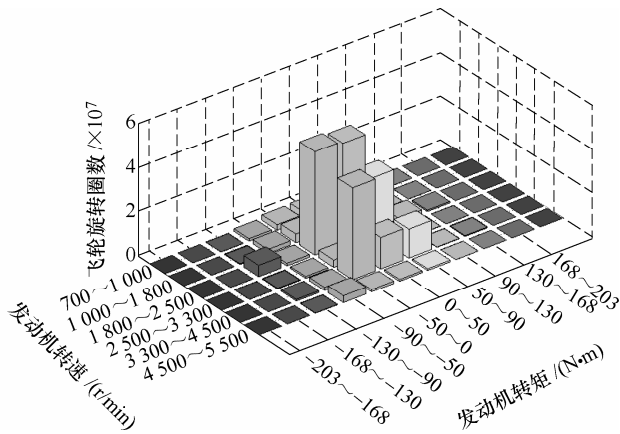


图 9 不同转速区间内各载荷等级对应的飞轮旋转圈数直方图

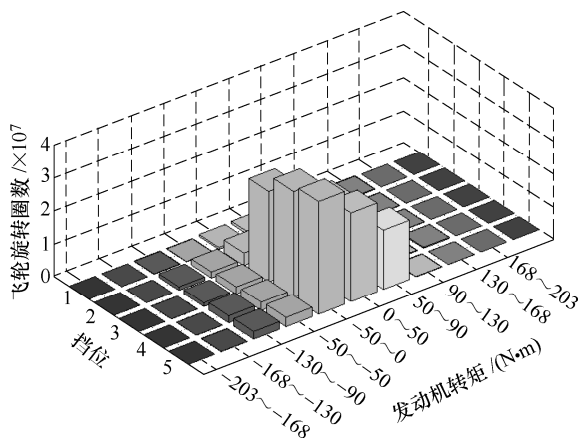


图 10 不同挡位下各载荷等级对应的飞轮旋转圈数直方图

的统计极值理论是关于随机变量序列的最大(小)值渐进分布的理论,基于这一理论的门限峰值法(Peak over threshold, POT)就是对超越一定门限的数据建模。因此,利用统计极值理论方法能够有效地对随机序列的最大(小)值的概率分布和数据序列的边际概率分布尾部进行建模,基于相应的数学模型能够估计随机序列的尾部特征。门限峰值法算法较简单,精度较高,对载荷谱进行外推时,运用门限峰值法对极值分布进行统计推断,可以得到很好的效果。

### 3.4.2 GPD 分布

极值理论涉及极小值与极大值(统称为极值)的极限分布问题。广义 Pareto 分布即双参数的广义极值分布,是基于门限峰值法的样本极大值极限分布。

广义极值分布的分布函数基于以下定理。

设 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 独立同分布随机变量,公共分布为 $F(x)$ ,记

$$A_n^* = \max(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (5)$$

则对足够大的 $n$ ,设 $P(x)$ 为概率分布函数,则有

$$P(A_n^* \leq x) \approx G(x)$$

$$G_{u,\xi,\sigma}(x) = \begin{cases} 1 - \left[ 1 + \xi \left( \frac{x-u}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} & \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{x-u}{\sigma}\right) & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$x \in \begin{cases} (u, \infty) & \xi > 0 \\ \left(u, u - \frac{\sigma}{\xi}\right) & \xi < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\xi$  ——形状参数,当形状参数由小变大时,尾部逐渐变厚;

$u$  ——位置参数(临界值);

$\sigma$  ——尺度参数,  $\sigma > 0$ 。

当 $u=0, \sigma=1$ 时,就是标准的 Pareto 分布。极值分布模型主要用于拟合样本数据序列分布的尾部特征,对随机序列的最大(小)的概率分布和数据序列的边际分布尾部进行建模。

### 3.4.3 极值模型的门限值确定

极小值的门限值 $u_{\min}$ 应极小,极大值的门限值 $u_{\max}$ 应极大,但实际上 $u_{\min}$ 越小, $u_{\max}$ 越大,则用来估计尾部特征的样本观测值就越少,所以确定适当的门限值是极值估计的关键。统计学上常用 QQ 图和样本均超额函数图来确定门限值,本文采取样本均超额函数图的方法。均超额函数的定义为

$$e(u) = E(X - u | X > u) \quad (8)$$

即超过 $u$ 的样本超额均值。由于 $X$ 的分布未知,故经常采用如下的样本均超额函数

$$e(\mu) = \frac{1}{N_\mu} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)_+ \quad (9)$$

式中  $\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)_+$  ——阈值 $\mu$ 的条件样本余额观测值的总和;

$N_\mu$  ——超越阈值 $\mu$ 的条件样本余额观测值的个数,样本均超额函数图为点 $(\mu, e(\mu))$ 构成的曲线。

把样本观测值排序,作出样本均超额函数图,看图形是否近似满足正斜率的线性关系,如果满足,再拟合线性关系,取其与样本均超额函数图的首个交点为门限值。

### 3.4.4 载荷谱时域外推步骤

基于门限极值理论的载荷谱时域外推具体步骤如下所述。

(1) 把实际采集获得的用户载荷谱进行小循环过滤和提取峰谷值预处理。

(2) 选择合适的门限值 $u_{\min}$ 和 $u_{\max}$ ,用 POT 方法提取超过门限值的所有极值点,估计超过值的平

均值, 同时得到这些超过值的 GPD 分布。

(3) 结合超过值的分布, 在现有实测载荷序列基础上产生随机载荷序列, 将得到的各个载荷时间序列连接起来即可得到外推的时域信号。

与传统的雨流法外推相比, 这种时域外推方法直接将测试的载荷序列进行外推而不需要一系列的变换, 因此所产生的循环更加真实, 减少了环节过多产生的误差。将图 7 中的压缩载荷谱进行 10 倍时域外推的结果如图 11 所示。

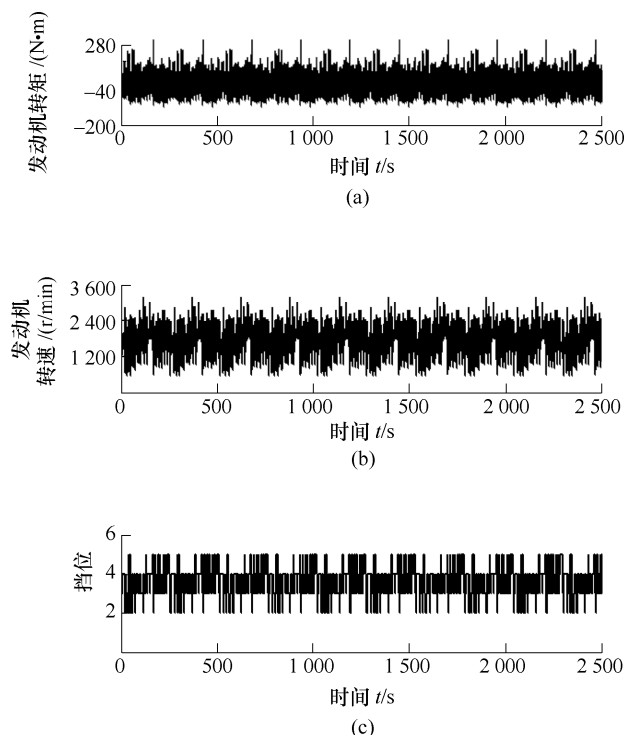


图 11 载荷谱时域外推

## 4 室内台架试验方法

### 4.1 程序载荷试验

由于汽车传动系所受的载荷是随机载荷, 因此进行随机疲劳试验是最优选择, 但随机疲劳试验必须使用动态特性很高的台架设备, 试验费用高, 所以常将其转化为程序载荷, 进行程序控制疲劳试验。对不同挡位及不同转速区间内飞轮旋转圈数进行统计(表 1 和表 2), 即可获得各载荷等级下不同挡位及不同转速区间对应的各工况时间比例。确定传动系部件的寿命里程后即可确定程序循环的时间, 进而再依照上述方法确定程序循环下各工况的时间比例(表 3)。程序循环的载荷工况循环尽量按照中-高-低-中的顺序加载, 这种顺序更接近传动系部件实际载荷的随机工况。

### 4.2 随机载荷试验

与原始载荷谱相比, 经过雨流计数方法压缩处理的载荷谱的时间历程大大缩减且保持了相同的疲劳损伤, 但如果直接用于室内台架试验, 虽然载荷损伤效果保持不变, 但是相邻载荷之间的时间关系已经改变。根据台架机械系统及测功机的响应特性, 可以用如下方法对压缩载荷进行处理。

(1) 重新定义采样率。如果台架系统响应特性较低, 则很难满足载荷谱中频率过高成分的加载要求, 可以通过定义新的采样率来降低过高的加载频率响应。

(2) 通过正(余)弦曲线和样条函数插值的方法对变化过“陡”的曲线进行插补(图 12)。

表 3 程序载荷试验循环工况

| 挡位 | 发动机转速/(r/min) | 发动机转矩/(N·m) | 时间/s  | 挡位 | 发动机转速/(r/min) | 发动机转矩/(N·m) | 时间/s |
|----|---------------|-------------|-------|----|---------------|-------------|------|
| N  | 怠速转速          | 0           | 15    | 5  | 1 000         | 35          | 25   |
| R  | 1 200         | 70          | 90    | 5  | 3 000         | 110         | 850  |
| N  | 怠速转速          | 0           | 15    | 4  | 3 000         | 110         | 748  |
| R  | 2 500         | 110         | 120   | 3  | 3 000         | 110         | 675  |
| N  | 怠速转速          | 0           | 15    | 2  | 3 000         | 110         | 558  |
| 1  | 1 800         | 70          | 18    | 1  | 3 000         | 110         | 38   |
| 2  | 1 800         | 70          | 115   | 1  | 4 500         | 150         | 41   |
| 3  | 1 800         | 70          | 825   | 2  | 4 500         | 150         | 332  |
| 4  | 1 800         | 70          | 972   | 3  | 4 500         | 150         | 351  |
| 5  | 1 800         | 70          | 1 029 | 4  | 4 500         | 150         | 654  |
| 5  | 5 000         | 185         | 234   | 5  | 4 500         | 150         | 693  |
| 4  | 5 000         | 185         | 135   | 4  | 5 500         | 150         | 60   |
| 3  | 5 000         | 185         | 126   | 3  | 5 500         | 150         | 50   |
| 2  | 5 000         | 185         | 80    | 2  | 5 500         | 150         | 45   |
| 1  | 5 000         | 185         | 30    | 3  | 5 500         | 150         | 50   |
| 1  | 1 000         | 35          | 811   | 4  | 5 500         | 150         | 60   |
| 2  | 1 000         | 35          | 748   | 5  | 5 500         | 150         | 80   |
| 3  | 1 000         | 35          | 400   | 4  | 5 500         | 150         | 60   |
| 4  | 1 000         | 35          | 43    | 5  | 5 500         | 150         | 80   |

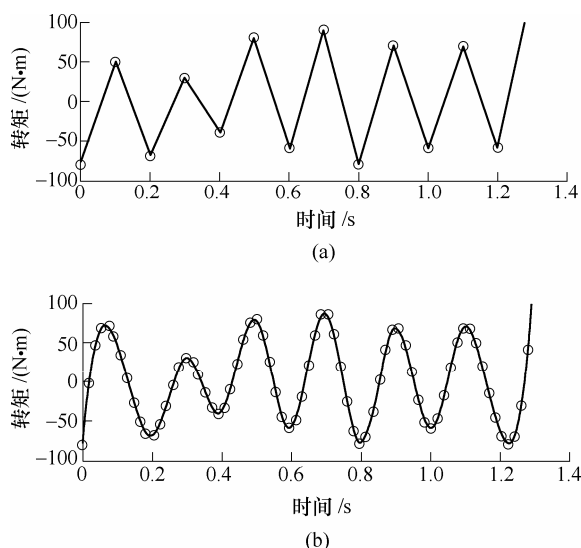


图12 随机载荷原始数据与处理后数据对比

(3) 定义升(降)速斜率。对载荷谱中转速时间序列进行拟合,降低升降速斜率以便满足台架系统和测功机的响应特性要求。

(4) 设定载荷和转速上限值,防止畸点载荷过高而损坏台架系统。

## 5 结论

讨论了汽车传动系室内台架可靠性试验方法。对关联用户使用的载荷谱数据进行无效幅值去除时,选择合适的省略基准是载荷处理的关键问题。提出了基于不同载荷等级转速和挡位的统计分布方法,可以有效获得转矩、转速和挡位等传动系工况关键参数的对应关系和统计分布频次。基于统计极值理论的时域外推方法不仅使外推后载荷的循环次数增加,而且载荷的幅值也有所增大,很好地体现了复杂工况载荷的多变性。运用重新定义采样率和样条插补等方法对随机载荷进行处理,使其能够很好地满足室内台架特性。本文所述的程序载荷谱和随机载荷谱编制方法为汽车传动系室内台架可靠性试验提供了参考依据。

## 参考文献

- [1] 高云凯,徐成民,方剑光. 车身台架疲劳试验程序载荷谱研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 92-98.  
GAO Yunkai, XU Chengmin, FANG Jianguang. Study on the programmed load spectrum of the body fatigue bench test[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 92-98.
- [2] 邹喜红, 谯凯, 石晓辉, 等. 基于远程参数控制的DCT关键零部件道路模拟试验[J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1537-1541.  
ZOU Xihong, QIAO Kai, SHI Xiaohui, et al. Road

simulation test of DCT key parts based on RPC[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(11): 1537-1541.

- [3] 郭虎, 陈文华, 樊晓燕, 等. 汽车试验场可靠性试验强化系数的研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 73-81.  
GUO Hu, CHEN Wenhua, FAN Xiaoyan, et al. Research of enhancement coefficient of automobile reliability enhancement test on proving ground[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(10): 73-81.
- [4] 陈欣, 项昌乐, 郑慕侨. 车辆传动系多工况随机载荷谱的统计处理方法[J]. 汽车工程, 1999, 21(4): 232-237.  
CHEN Xin, XIANG Changle, ZHENG Muqiao. Statistical method for random load spectrum of vehicle transmission under multiple working conditions[J]. Automotive Engineering, 1999, 21(4): 232-237.
- [5] 门玉琢, 李显生, 于海波. 与用户相关的汽车可靠性试验新方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 223-229.  
MEN Yuzhuo, LI Xiansheng, YU Haibo. New method for automobile test correlated with customers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 223-229.
- [6] CAMPEAN F. Vehicle foresigh customer correlation of engine components tests using life prediction modeling[C]//SAE 2002 World Congress. Michigan: Society of Automotive Engineers, 2002: 108-113.
- [7] 符代竹. 基于载荷谱的MT变速器疲劳设计及试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
FU Daizhu. The manual transmission fatigue design and test study based on road load data and S-N cure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006
- [8] 阎楚良, 王公权. 雨流计数法及其统计处理程序研究[J]. 农业机械学报, 1982, 12(2): 88-101.  
YAN Chuliang, WANG Gongquan. Investigation of rain-flow counting method and its program of statistical treatment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1982, 12(2): 88-101.
- [9] YAY K, EREKE I, BILIR M, et al. Fatigue strength of an urban type midi bus vehicle chassis by using fem analysis and accelerated fatigue life test[R]. SAE, 2009-01-1453, 2009.
- [10] JOHANNESSON P. Extrapolation of load histories and spectra[J]. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 2006(29): 201-207.
- [11] 赵礼辉, 郑松林, 冯金芝. 基于低载强化特性的疲劳寿命估计方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 115-121.  
ZHAO Lihui, ZHENG Songlin, FENG Jinzhi. Fatigue life prediction based on simplified low-amplitude-load strengthening model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 115-121.

作者简介: 李文礼(通信作者), 男, 1983年出生, 博士研究生。主要研究方向为汽车传动系试验检测技术。

E-mail: liwenli999@163.com