

无人车室内道路模拟试验技术

0. 引言

随着无人驾驶技术的落地速度加快，包括环卫清洁、无人配送等细分场景的低速无人车已经开始小批量商用。2022年，中国低速无人驾驶行业销售规模约52亿元，各类低速无人车产品销售数量约20000台。



图1 无人配送车（图片来源于网络）

随着无人车技术的发展更新，行业对无人车的可靠性和耐久性的要求也不断提高。与室内运行的移动机器人相比，无人车的运行路面显得更为严酷，包括园区道路、公共道路、减速带、甚至坏路等，严酷的道路环境对无人车的零部件带来了更多挑战，主要的失效模式有疲劳损伤、机械磨损、腐蚀、蠕变、老化等。其中，无人车中大多数的关键零部件（例如无人车中的前桥、后桥、悬架等）都是疲劳失效。而通过耐久性试验，可以有效地将这些问题发现，并有针对性地改进。

耐久性试验主要包括道路试验、试验场试验和室内道路模拟试验三种试验类型。而相比于其他两类，室内道路模拟试验具有

快速高效的特点。它可以在室内对产品持续进行测试，不受环境天气等条件的限制，同时可以通过道路谱编辑缩短试验时间，节约试验成本。四立柱实验系统是室内道路模拟试验所常用的试验设备，并已在汽车领域得到了广泛的应用。对于无人车，可以利用四立柱实验系统对其开展室内道路模拟试验，从而快速、有效地考核其耐久性，并为产品设计研发与更新提供参考。

1. 室内道路模拟技术原理

室内道路模拟试验总体可以分为以下四个部分，即路谱采集、路谱数据分析/编辑、系统模型识别/数据迭代、耐久性试验。



图 2 室内道路模拟技术原理图

路谱采集通过布置在产品关键部位的传感器，在产品行驶在规定的路面环境下时采集振动等信号，并进行储存，从而为后续试验模拟道路环境提供依据；路谱数据编辑包括预处理和编辑两步。预处理对采集信号的毛刺、漂移等问题进行处理，剔除异常时域信号，数据编辑通过剔除对损伤贡献较小的信号，对路谱数据进行加速处理，实现缩短试验时间的效果；系统模式识别/数据迭代通过计算频率响应函数，将路谱采集的振动信号转化为振动台振动的控制信号。通过选取控制精度进行迭代，保证振动台对产品激励的准确性；最后，在完成信号的处理分析迭代后，进行耐

久性试验，在有限的场地内，快速达到长距离耐久性试验的效果，对产品进行考核。

1.1. 道路谱采集

道路谱采集是通过布置传感器，采集产品在特定路面上运行过程中的振动数据，如轴头加速度等，用来反映产品在行驶过程中的情况。采集到的数据经过编辑后，会输入振动测试系统，系统通过识别迭代，在试验中对产品施加振动激励，达到模拟运行时振动的效果。

道路谱采集过程中，需要对采集路面、工况、传感器布点等内容进行考虑。

1) 采集路面：

试验场采集路段的选择应该保证所选路段类型具有代表性、典型性、概括性，要能够反映汽车实际行驶过程中的事件。试验场采集路面类型及其比例的确定应满足与用户实际路面的载荷分布一致。采集过程中，需要及时检查各个循环的数据一致性，要保证其一致性较好。

2) 采集工况

进行路谱采集时，应规定采集的工况，工况同样需具有代表性，要能反映产品正常工作过程中的情况。通常进行工况设置时，需要考虑运行中的负载、加/减速、转弯/刹车次数等情况。

3) 传感器选择：

采集过程可能会用到的传感器包括：

加速度传感器：基于单自由度质量弹簧工作原理，在传感器固有频率之下，其加速度响应正比于激励。常用的有压电式加速度传感器，结构精简，且动态特性优良。加速度传感器在使用过程中需要注意灵敏度的选择。



图 3 路谱采集设备和加速度传感器

LVDT（线性变化差动变压器）：用于测量两点间的相对线性位移。

应变传感器：用于测量结构某处的局部变形量。

4) 传感器布点：

车轮加速度传感器一般布置在尽量靠近轮胎中心的轴头位置；车身加速度传感器布置在车身正对车轮上方位置，加速度传感器的标记方向尽量与垂向重叠。在 CAE 分析中的应力集中位置、疲劳分析危险位置、道路试验有开裂历史的位置以及关键部位应安装应变传感器。

5) 采集参数设置：

采集路面载荷谱数据时，一方面要保证数据的准确性和有效性，另一方面要防止采集到的数据发生信号混淆现象，所以数据

采集频率必须满足采样定理。

1.2. 路谱分析和编辑

路谱分析和预处理主要是分析采集到的原始信号是否准确，并剔除采集过程引入的噪声和漂移信号。路谱编辑是对预处理后的道路谱数据进行编辑处理，剔除对振动损伤贡献小的信号，达到加速的目的。

1) 预处理：

在信号测试过程中，可能由于电流原因或机械原因，如路面上的石块撞击传感器时，采集得到的信号会存在奇异值，即毛刺信号。该信号具有高频、大幅值、随机性等特点。毛刺信号对载荷谱高频分量的影响较大，将对道路模拟试验的精度带来负面的影响，因此，在载荷谱预处理时需要将其剔除。

一般由试验直接得到的道路原始载荷谱数据在分析和使用之前都需要进行数据的预处理。主要包括低通滤波、去毛刺及去除趋势项等。数据的预处理可以通过西门子 tecware 等工业软件实现。

2) 载荷谱编辑：

载荷谱编辑时所用到的方法主要是时域编辑，通过设定阈值（一般为应变或加速度等最大载荷谱幅值的百分比等），对采集的应变/加速度载荷谱进行裁减，剔除对损伤影响较小的应变/加速度信号，再选用半正弦波进行平滑连接。该步骤可使用西门子 tecware 软件实现。

为了保证加速的有效性，可以从伪损伤和 PSD 两个角度对载荷谱编辑的效果进行考量。通常来讲，常见的编辑标准之一就是伪损伤保留比例。如，编辑后的载荷谱伪损伤保留 90%以上等。当载荷谱编辑完后，可计算其 PSD，通过编辑前后 PSD 趋势的对比，判断编辑后的载荷谱是否合适。

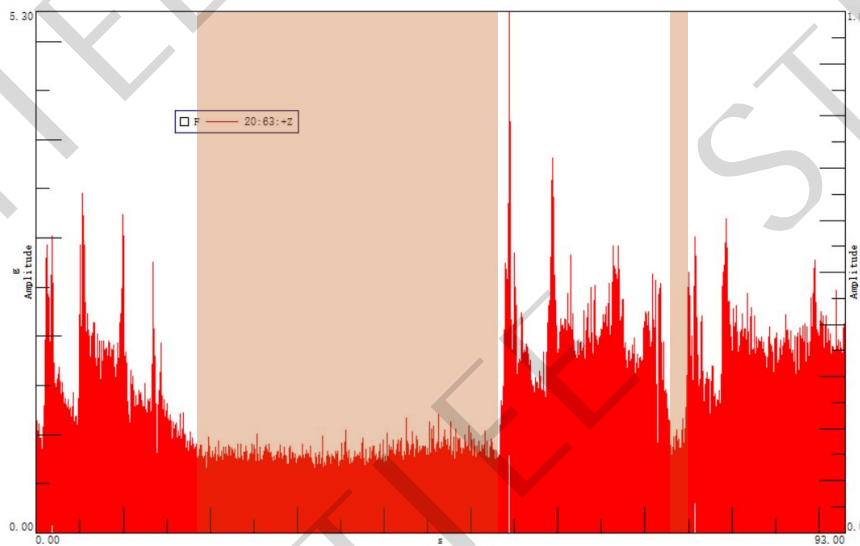


图 4 载荷谱编辑示例

1.3. 识别、数据迭代

为了将编辑后的道路谱用于试验台，对产品施加振动，需要将产品安装在台架上，将编辑后的道路谱输入测试系统，通过迭代计算，生成供系统识别，产生振动激励的信号。这一过程通过频率响应函数实现。频响函数反映了道路模拟台架作动缸的加速度等信号与产品上关注的位置点响应信号间的数学关系。通过频响函数，可以保证振动试验台对产品所施加的激励与输入的道路谱在精度要求内相符。系统自动进行迭代计算，得到试验系统的驱动数据。当满足误差要求后，迭代完成。

1.4. 耐久性试验

迭代完成后，会得到相对应的驱动数据。在试验中运行驱动程序，完成相应的耐久试验流程。通过将响应谱循环播放，可以进行目标耐久性验证试验，探究样品在目标里程下的疲劳与老化情况。



图 5 四立柱试验系统

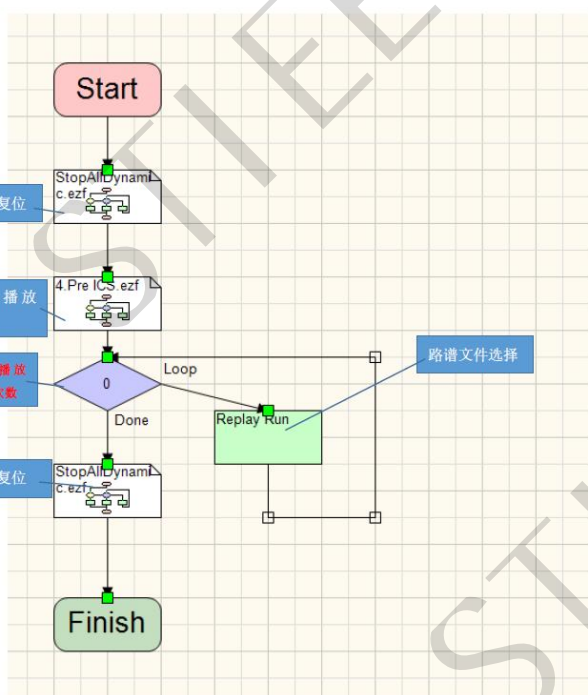


图 6 耐久性试验流程

2. 服务能力

机器人可靠性工程服务产品线配置了西门子 Simcenter 数据采集系统与北京博科测试系统股份有限公司的道路模拟试验系

统，对机器人进行道路模拟试验。

数采系统通过三轴加速度传感器，可以实现最大 **32 通道**的加速度数据采集与 **8 通道**的应变数据采集工作。针对采集数据，可以进行**加速处理**，作为室内道路模拟试验的输入数据；同时可也对路谱数据进行处理，得到 **PSD 分析**结果，供后续随机振动测试分析使用。

道路模拟试验系统基于 Servotest 公司设备及分析系统开发，技术参数如下：

- a) 最大试验机器人重量： $\leq 1000\text{kg}$ ；
- b) 轮距：400-1200mm；
- c) 轴距：400-1500mm；
- b) 道路模拟激振作动器个数：4 个；
- c) 机器人满载为 1000kg 重量下，每个车轮托盘处最大加速度响应： $\geq 2\text{g}$ ；
- d) 机器人满载为 1000kg 重量下，每个车轮托盘处最大速度响应： $\geq 0.9\text{m/s}$ ；
- e) 最大工作位移： $\geq \pm 50\text{mm}$ ；
- f) 系统工作频率：0.1~100Hz。