

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

重型汽车操纵稳定性试验通用条件

General condition of vehicle dynamics test for heavy vehicles and buses

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本标准由中华人民共和国工业和信息化部提出。

本标准由全国汽车标准化技术委员会（SAC/TC114）归口。

本标准等同采用ISO 15037-2-2002。

本标准起草单位：吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室、一汽解放有限公司商用车开发研究院

本标准主要起草人：詹军、管欣、杨得军、郭睿、高越、贾鑫、卢萍萍、郭学立、赵旗、郭平、赵云达、程超、王金松、薛鹏程、那光鑫、隋铭轩、王哲、夏子昂

重型汽车操纵稳定性试验通用条件

1 范围

本标准规定了重型商用汽车列车的操纵稳定性试验方法。

本标准适用于总质量超过 3000kg 的 M2、M3、N2、N3类汽车，带拖挂的铰接轻型车可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 3730.1 汽车和挂车类型的术语和定义

3 变量

3.1 参考坐标系

试验记录的运动变量坐标原点通常取在车辆质心，也可取在其它位置处，但应记录在试验报告中，见附录A。。

3.2 需确定的变量

与车辆操纵稳定性相关的驾驶员输入和车辆响应描述主要变量如下：

- 转向盘转角， δ_{sw} ；
- 转向盘力矩， M_s ；
- 纵向速度， u ；
- 每个车辆单元的侧偏角， β 或者侧向速度， v ；
- 纵向加速度， a_x ；
- 每个车辆单元的侧向加速度， a_y ；
- 每个车辆单元的横摆角速度， r ；
- 每个车辆单元的侧倾角速度， p ；
- 俯仰角速度， q ；
- 每个车辆单元的侧倾角， ϕ ；
- 俯仰角， θ ；
- 铰接角， $\Delta \psi$ ；

所有参考该标准的测试试验均应指明使用了哪些变量。依据特定的标准进行试验，可增加或推荐其它变量。这些变量可以直接测量或者由测量值计算得到。

4 测量设备

4.1 说明

试验采用多通道采集系统和传感器测量。传感器和记录系统的工作范围以及推荐的最大误差如表1所示。无论是测量还是计算的变量均应达到指定的精度要求，为了计算某些特征值希望提高测量精度。如果采用系统的误差超过推荐值，那么该误差以及实际最大误差应记录在试验报告中，见附录A。

表1 变量及其典型工作范围和推荐的最大误差

变量	典型工作范围	推荐最大误差
转向盘转角	$-360^{\circ} \sim 360^{\circ}$	$\pm 1^{\circ}$, $\delta_{sw} < 50^{\circ}$ 时 $\pm 2^{\circ}$, $50^{\circ} < \delta_{sw} < 180^{\circ}$ 时 $\pm 4^{\circ}$, $\delta_{sw} > 180^{\circ}$ 时
转向盘力矩	$-30\text{Nm} \sim 30\text{Nm}$	$\pm 0.1\text{Nm}$, $M_{H1} \leq 10\text{Nm}$ $\pm 0.3\text{Nm}$, $M_{H1} > 10\text{Nm}$
纵向速度	$0\text{km/h} \sim 180\text{km/h}$	$\pm 1\text{km/h}$, $u \leq 100\text{km/h}$ $\pm 2\text{km/h}$, $u > 100\text{km/h}$
侧向速度	$-36\text{km/h} \sim 36\text{km/h}$	$\pm 0.72\text{km/h}$
侧偏角	$-20^{\circ} \sim 20^{\circ}$	$\pm 0.3^{\circ}$
纵向加速度	$-15\text{m/s}^2 \sim 15\text{m/s}^2$	$\pm 0.15\text{m/s}^2$
侧向加速度	$-15\text{m/s}^2 \sim 15\text{m/s}^2$	$\pm 0.15\text{m/s}^2$
横摆角速度	$-50^{\circ}/\text{s} \sim 50^{\circ}/\text{s}$	$\pm 0.3^{\circ}/\text{s}$, $r \leq 20^{\circ}$ 时 $\pm 1^{\circ}/\text{s}$, $r > 20^{\circ}$ 时
俯仰角速度	$-50^{\circ}/\text{s} \sim 50^{\circ}/\text{s}$	$\pm 0.3^{\circ}/\text{s}$, $q \leq 20^{\circ}$ 时 $\pm 1^{\circ}/\text{s}$, $q > 20^{\circ}$ 时
侧倾角速度	$-50^{\circ}/\text{s} \sim 50^{\circ}/\text{s}$	$\pm 0.3^{\circ}/\text{s}$, $p \leq 20^{\circ}$ 时 $\pm 1^{\circ}/\text{s}$, $p > 20^{\circ}$ 时
侧倾角	$-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$	$\pm 0.15^{\circ}$
俯仰角	$-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$	$\pm 0.15^{\circ}$

4.2 传感器安装

应准确记录传感器在参考坐标系中的安装位置，以便数据处理中对数据准确转化，传感器安装参见附录C。

4.3 数据处理

4.3.1 概述

重型汽车操纵稳定性的测试、评价的频率范围0Hz~2Hz。

4.3.2 模拟信号试调

4.3.2.1 传感器和采集系统的带宽应不小于8Hz。

4.3.2.2 对信号的滤波应采用低通滤波器。通频带宽（从0Hz到-3dB处频率 f_0 ）不得小于9 Hz。在0Hz~2Hz频率范围内，幅值误差应小于 $\pm 0.5\%$ 。所有模拟信号应使用具有相同相位特性的滤波器进行处理，以保证由于滤波带来的时间延迟是相同的。

注：为保存低频信号，信号应采用直流耦合。由于包含不同频率成分的模拟信号滤波处理会发生相移，我们推荐采用4.3.3节中描述的数字信号处理方法。

4.3.3 混叠误差及抗混叠滤波器

4.3.3.1 模拟信号处理的准备包括：选择避免混叠误差的采样频率和滤波器幅值衰减特性、滤波器的相位滞后和时间延迟特性。

4.3.3.2 采样和数字化应考虑的内容：保证数字化误差最小的预采样放大率、每次采样的位数、每个周期的采样数、采样和保持放大器、样本空间。对于其它无相移数字滤波器应考虑通带、阻带、衰减、允许纹波的选择，以及滤波器相位滞后的校正。

4.3.3.3 为了实现整体数据达到 $\pm 0.5\%$ 的采集精度，应综合考虑上述影响因素。

4.3.3.4 巴特沃斯滤波器的衰减和相移信息参见附录D。为了避免无法校正的混叠误差，在采样和数字化之前对模拟信号应正确滤波。滤波器阶次及其通带的选择应根据关注频率范围和对应采样频率下信号平整度的要求来确定。最低滤波特性和最小采样频率应满足：

a) 在 $0\text{Hz}\sim 2\text{Hz}$ 的频率范围内，模拟信号的最大衰减量应小于信号数字化的分辨率；

b) 在二分之一采样频率处（即奈奎斯特频率或折叠频率），信号和噪声的所有频率成分的大小要减小到小于数字化分辨率。

示例：对于 0.05% 的分辨率，在 2Hz 范围内滤波器的衰减应小于 0.05% 。对于二分之一采样频率以上的所有频率处衰减应大于 99.95% 。

4.3.3.5 推荐抗混叠滤波器是四阶或者更高，参见附录D。应抗混叠滤波，也应避免过度的模拟信号滤波。此外，所有的滤波器应具有相同的相位特性，以确保信号之间的时间延迟差异满足时域测量精度的要求。

注：因为被测变量幅值相乘时，相移及相应的时间延迟会增加，因此当被测变量相乘后形成新的变量时，相移尤其应注意。通过增加滤波器的截止频率 f_0 可以降低相移及时间延迟。

4.3.4 采样及数字化

4.3.4.1 在 2Hz 处，每毫秒信号的幅值变化可达到 3% 。应限制模拟输入变化超过 0.1% 而引起的动态误差，采样或数字化的时间应小于 $32\ \mu\text{s}$ 。每一对或一组要比较的样本数据应同时或在足够短的时间内采集。

4.3.4.2 数字化应采用14位或更高分辨率（ $\pm 0.05\%$ ）， $2\ \text{LSB}$ （ $\pm 0.1\%$ ）精度的系统。数字化前模拟信号的放大应保证：在数字化过程中，由于有限分辨率和数字化的不准确而导致的综合误差应小于 0.25% 。

4.3.5 无相移数字滤波器

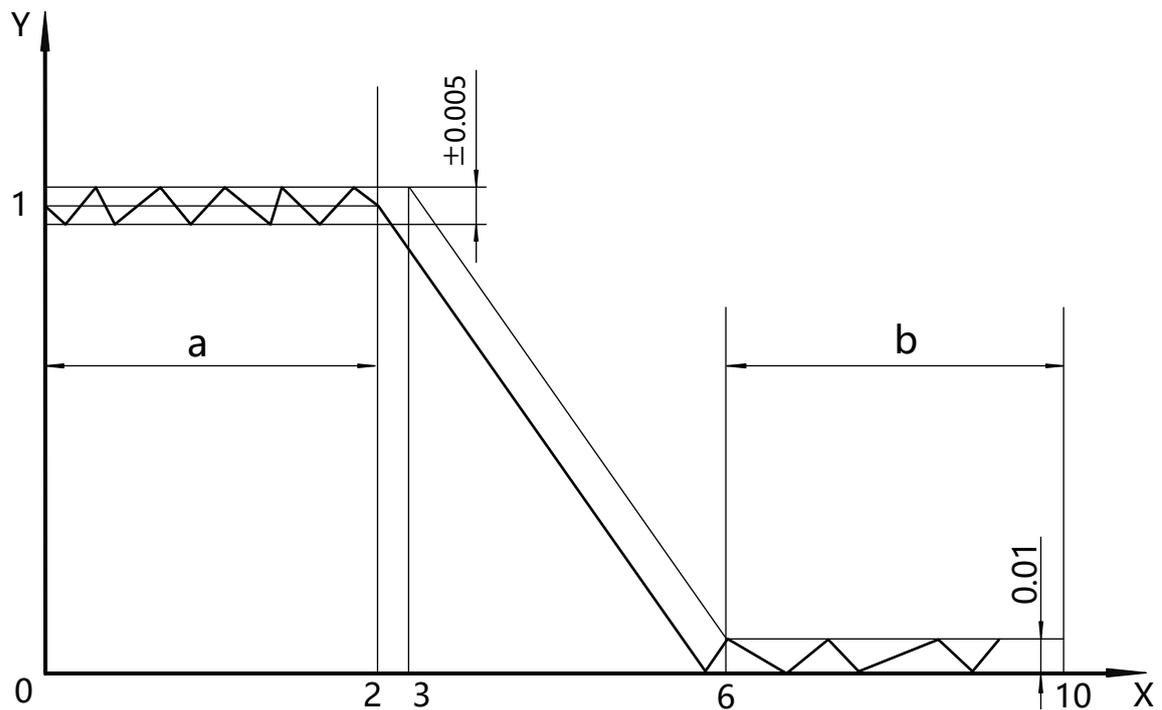
对于用于评价数据的滤波，无相移（0相移）数字滤波器应具有以下特点（见图1）：

——通带的范围应是 $0\ \text{Hz}\sim 2\ \text{Hz}$ ；

——阻带应在 $6\ \text{Hz}\sim 10\ \text{Hz}$ 之间开始；

——通带滤波器增益应是 1 ± 0.005 ；

——阻带滤波器增益应是 ± 0.01 。



说明:

X——频率, f (Hz);

Y——滤波器增益;

a——通带;

b——阻带。

图1 无相移数字滤波器特点要求

5 试验条件

5.1 总则

本章主要说明环境条件和汽车测试条件的要求, 特定的试验也应遵循这些条件。任何与本标准规定不一致的都应在测试报告中列出, 见附录A和附录B, 包括显示结果的各图表。对于每种测试方法, 特定的测试条件和会变化的数据 (如轮胎花纹深度) 应按附录B的格式做一个单独的测试报告。

5.2 试验道路

所有试验都应在平整、干净、干燥并且铺设均匀的道路上进行。测试道路的坡度在任何方向不能超过2% (推荐1.5%)。对于每次试验, 测试报告应记录试验道路表面条件和道路材料, 见附录B。

5.3 风速

试验中周围环境风速应不超过3m/s。每次试验, 试验报告均应记录测试时的气候条件, 见附录B。

5.4 试验汽车

试验汽车的基本数据信息应记录在附录A的测试报告中。任何汽车参数的变化 (如负荷), 均应再次记录基本数据信息。

5.5 轮胎

5.5.1 轮胎应按照汽车制造商的说明书选择新轮胎安装到试验汽车上。如果轮胎制造商没有明确说明，轮胎应在被测试汽车或者相似汽车上磨合至少150km，但要保证无过度使用，如紧急刹车、急加速、急转弯、压路肩等等。磨合后，轮胎应保持在相同的位置进行测试。

5.5.2 轮胎花纹深度（包括轮胎整个接触地面的宽度及整个轮胎表面）应是初始轮胎花纹深度90%以上。

5.5.3 在试验测试条件中应记录轮胎的生产日期，见附录B，试验轮胎距生产日期不应超过一年。

5.5.4 轮胎应按照汽车制造商说明的对应试验环境温度的压力充气。对于胎压小于等于250kPa，冷充气压力的误差应为±5kPa；胎压超过250kPa时，误差应不超过2%。

5.5.5 预热前的轮胎压力和轮胎胎面花纹深度应在试验报告中记录，见附录B。

5.5.6 除基本轮胎条件外，其它条件下也可进行试验。具体的细节应在试验报告中记录，见附录B。

5.6 关键部件

影响整车性能测试的关键部件（如部件型号及车型号）和测试条件（如减震器参数和悬架几何参数）应满足制造商的说明。任何偏离制造商说明的数据都应记录在基本信息里，见附录A。

5.7 载荷条件

5.7.1 一般条件

5.7.1.1 试验总质量不应超过制造商规定的最大总质量和最大轴载荷，且应说明总质量和重心位置（纵向、侧向、垂向）。

5.7.1.2 为了试验车辆质量、重心位置及转动惯量应与设计相接近，其增加载荷应均布，由此产生的载荷应测量并记录到试验报告中，见附录A。

5.7.2 最大载荷条件

最大载荷条件是标准测试条件。最大载荷条件是指牵引车或拖挂车的总质量等于整车整备质量加上设计最大装载质量或使试验车处于设计最大总质量的状态，同时还应保证任意车轴上的荷载不超过标准要求最大轴载荷。试验车重心高度和附加载荷的质量分布应反映试验车的应用情况。

5.7.3 最小载荷条件

重型汽车最小载荷条件是指每个单元的整备质量加上试验仪器质量。对于牵引单元需加上驾驶员质量，另外根据需要可加上一个设备操作员或观察员的质量。最小载荷条件是可选做条件。

5.7.4 其它载荷条件

其它载荷条件可用于代表特殊运输条件。

6 试验准备

6.1 预热

在试验开始之前，所有汽车的相关部件都应进行预热从而使其温度能够达到代表一般驾驶条件下的温度。轮胎也应当进行预热使其达到能够代表正常驾驶条件的平衡温度和压力。汽车应按照试验速度行驶50km或者以 1m/s^2 的侧向加速度行驶5km（包括向左转向和向右转向）对轮胎进行预热。

6.2 初始条件

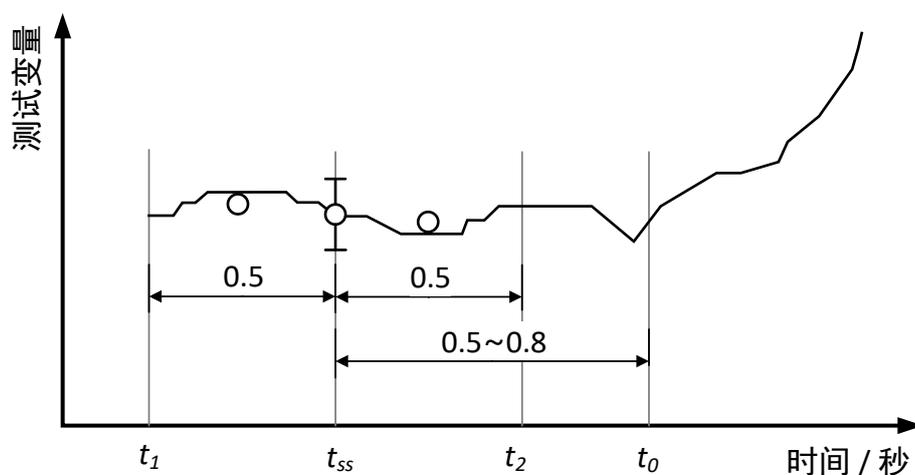
6.2.1 概述

汽车操纵稳定性试验需规定初始行驶状态，可以是稳态直线行驶也可以是稳态圆周行驶。

如果在试验标准中没有特别要求，试验过程中，对于手动变速器来说，对于多个挡位适用的应选用高挡位，对于自动变速器来说应采用D挡。换挡杆位置以及所选择的驾驶模式应当记录在试验报告中，见附件B。

在初始行驶条件下，转向盘的位置以及加速踏板的位置应尽可能的保持不变。用来估计稳态条件的观测时刻 t_{ss} 定义为参考时间点 t_0 之前0.5s~0.8s之间的时间点。观测时刻 t_{ss} 达到6.2.2和6.2.3的要求（如图2所示，定义的 t_1 和 t_2 ），应认为初始条件是稳定的。

注：如果仅是用来确定稳态值的试验方法，观测时刻 t_{ss} 与参考时间 t_0 相同。



说明：



t_0 ——实验中的时间参考点；

t_1 ——测量时间1；

t_2 ——测量时间2；

t_{ss} ——估计稳态工况的观测时刻

图2 试验观测时刻定义

6.2.2 稳态直线行驶

在 t_1 到 t_2 时间段内初始行驶的纵向速度不应超过标称值的 $\pm 3\%$ ，侧向加速度的平均值应保持在 $-0.3\text{m/s}^2 \sim 0.3\text{m/s}^2$ 的范围内。作为侧向加速度限制的替代，可以选择限定横摆角速度的平均值在 $-0.5\text{ }^\circ/\text{s} \sim 0.5\text{ }^\circ/\text{s}$ 范围内。

在 t_1 到 t_2 的时间段内，侧向加速度标准差不应超过 0.3m/s^2 。作为侧向加速度限制的替代，横摆角速度标准差不应超过 $0.5\text{ }^\circ/\text{s}$ 。

在时间段 $t_1 \sim t_{ss}$ 及 $t_{ss} \sim t_2$ 内，纵向速度的平均值偏差不应超过 $\pm 3\%$ 。

6.2.3 稳态圆周行驶

初始半径 R_0 通过下式进行计算：

$$R_0 = u_0/r \text{ 或 } R_0 = u_0^2/a_{y,0}$$

u_0 为初始纵向速度， r 为横摆角速度， $a_{y,0}$ 为初始侧向加速度。

在时间段 $t_1 \sim t_2$ 范围内，初始驾驶条件的初始半径在牵引车参考点的偏移量不应超过名义值 $\pm 0.5\text{m}$ 。

在 $t_1 \sim t_2$ 时间范围内，侧向加速度的标准差不应超过其平均值的5%；纵向速度的标准差不应超过其平均值的3%。

在时间段 $t_{1s} \sim t_{ss}$ 及 $t_{ss} \sim t_2$ 内，侧向加速度的标准差不应超过均值的5%。纵向速度的偏差不应超过均值的3%。

在 $t_1 \sim t_2$ 时间段内，侧向加速度的平均值不应超过标称值的 $\pm 3\%$ 。

表A.1 试验报告——一般数据模板（续）

转向 类型: _____
 总转向比: _____

制动系统 制动: _____
 生产商: _____
 类型: _____
 型号: _____
ABS 是 否
 生产商: _____
 类型: _____
 型号: _____
 根据批准的类型: _____
 根据联合国欧洲经济委员会的类别: _____
 制动性能（在静态试验载荷由滚筒式制动试验测得的）: _____
 在静态试验载荷下轴的制动力与刹车踏板力或在连接头或第一轴的压力之比
 _____ KN/daN (KN/KPa)
 制动执行器和各单元的反应时间, 该时间与驾驶员根据UNECE法规13, 附件6, 本标准2.1~2.4
 所测量的全制动控制应用时间有关。不管车轴是否在车辆上。

驱动类型: _____

轴n 悬架类型: _____
 轴的类型: _____
 型号: _____
 额定载荷: _____
 稳定杆类型: _____
 车轮数量: _____
 轮距: _____ m
 轮辋尺寸: _____

轮胎 类型: _____
 制作(翻新): _____
 日期: _____
 尺寸: _____
 序列号: _____

减震器 类型: _____
 标识号: _____
 数量: _____

转向 类型: _____
 总转向比: _____

表A.1 试验报告——一般数据模板（续）

制动系统 制动：_____

生产商：_____

类型：_____

型号：_____

ABS 是 否

生产商：_____

类型：_____

型号：_____

根据批准的类型：_____

制动性能（在静态试验载荷由滚筒式制动试验测得的）：_____

在静态试验载荷下轴的制动力与刹车踏板力或在连接头或第一轴的压力之比
_____KN/daN(KN/KPa)

制动执行器和各单元的反应时间, 该时间与驾驶员根据UNECE法规13, 附件6, 本标准2.1~2.4所测量的全制动控制应用时间有关。不管车轴是否在车辆上。

驱动类型：_____

胎面花纹深度：

单位为毫米

	轴 1		轴 2	
	内部	外部	内部	外部
原始花纹深度				
测试之前胎面环纹深度				
测试之后胎面环纹深度				

轮胎充气压力

压力——kpa

	轴 1	轴 n
冷态		
热态, 预热之后		
热态, 测试之后		

车辆或单元尺寸距离参考点的距离：

轴1 _____ m

轴n _____ m

后连接 _____ m

前连接 _____ m

总长度 _____ m

总宽度 _____ m

测试质量的总高度 _____ m

前连接距离地面的高度（在测试条件下） _____ m

后连接距离地面的高度（在测试条件下） _____ m

表A.1 试验报告——一般数据模板（续）

连接类型	前_____
	后_____
车辆负荷状况	整车整备质量
	轴1: 左轮_____kg 右轮_____kg
	轴n: 左轮 (s) _____kg 右轮 (s) _____kg
	车辆单元前连接的静态垂直力_____N
	测试条件下的车辆质量
	轴1: 左轮_____kg 右轮_____kg
	轴n: 左轮 (s) _____kg 右轮 (s) _____kg
	车辆单元前连接的静态垂直力_____N
	重心相对于地面的高度_____m
	横摆转动惯量_____kg*m ²
	侧向加速度传感器的位置:
	距离地面的高度_____m
	距离参考点的距离_____m
	附加负载的描述_____
	其他数据（尤其是与悬架设定相关_____

附录 C

(资料性附录)

传感器及其安装

C.1 综述

传感器(包括商用的和定制的)主要用于测量要求的和可选的变量。如果传感器不能直接测量需要的变量,在保证精度的基础上应适当地调整传感器信号以获取此变量。

由于试验仪器种类较多,因此应记录下每一种使用设备;并且将设备在汽车上的安装位置记录在试验数据表格上(见附件A)。

各种直接测量变量的传感器误差要求见下列条款。由几个传感器的输出信号计算得到的变量其净百分比误差可通过此变量的微分值除以计算变量获得。

C.2 转向盘转角

典型的传感器是多圈电位计或者数字光电编码器,它们通过齿轮与转向盘后部相连或者连接在“附加转向盘”上。

C.3 纵向速度

纵向速度传感器应安装在距离参考点尽可能近的位置上。在数据处理过程中,应记录速度传感器的安装位置,并进行必要的信号修正以获得参考点纵向速度。典型的传感器是五轮仪,其精度为0.2km/h;基于光学的或多普勒原理的“非接触”速度传感器,基于光学的速度传感器精度为0.1km/h;基于多普勒的速度传感器精度为0.5km/h。五轮仪的稳态信号与水平速度非常接近,而光学传感器则测量纵向速度(水平速度在X方向上的分量等于水平速度与侧偏角余弦的乘积)。另外一种可选测量纵向速度的方法是利用全球定位系统(GPS)(见C.11)。

C.4 侧向速度及侧偏角

按照产品说明书安装的基于光学原理的双向速度传感器可直接测量给定点的侧向速度。传感器的安装位置应记录。任何其它点的侧向速度则可以通过两个侧向速度传感器进行内插或外推获得,也可通过测量点的侧向速度加上横摆角速度与所求点与测量点之间距离的乘积得到。侧偏角通过侧向速度除以纵向速度的正切得到。商用双向速度传感器满量程 $\pm 10\text{m/s}$,稳态满量程精度 $\pm 1\%$ 。

侧向速度也可以通过侧向加速度的积分(经过位置、侧倾角及表面倾斜误差纠正)减去纵向速度与横摆角速度的乘积得到,之后可计算得到侧偏角。因为净加速度误差(包括零偏)是会累积的,此方法仅适用于短时间测试。

C.5 角速度

横摆角速度、侧倾角速度及俯仰角速度可以通过按照产品说明书进行安装的角速度传感器直接测量。传统的角速度传感器是指陀螺仪。一般情况下,良好的陀螺仪性能包括:在1/2满量程范围内,线

性度为满量程的 $\pm 0.2\% \sim \pm 0.5\%$ ，在1/2到满量程范围内，线性度为满量程的 $\pm 1\% \sim \pm 2\%$ ；0.04%的交叉灵敏度；满量程 $\pm 0.05\%$ 的阈值；满量程0.15%的滞后。基于科氏加速度、光纤、激光或者其他物理原理的角速度传感器已商业化。它们通常拥有以下特性：满量程 $\pm 0.1\% \sim 1\%$ 的线性度；0.01%的阈值灵敏度；零滞后。

角速度传感器通常固定在汽车上。因此，在稳态转向过程中它们测量的是大地平面横摆角速度乘以车身侧倾角的余弦值。为了获得大地平面的横摆角速度，必须通过车身侧倾角和俯仰角修正。

如果侧偏角传感器同时安装在前轴和后轴，大地平面内的横摆角速度可以通过前轴和后轴侧向速度的差除以两传感器之间的纵向距离计算得到。

C.6 侧向加速度

在大多数工况中，尤其是在稳态条件下，关注的量是向心加速度。典型情况下实际测量量是侧向加速度。如果其它汽车运动状态量已知，通过侧向加速度可得到向心加速度。

侧向加速度 (a_y) 可以通过在足够带宽范围 (包括稳态) 内具有足够精度的加速度计进行测量。其安装方法如下列方式之一：

a) 加速度计安装在簧载质量上，并且使量测轴与汽车Yv轴保持平齐。如果安装点不在汽车坐标系原点时，由于横摆加速度、侧倾加速度和俯仰加速度的影响，其输出会存在一定误差。尽管这些误差在稳态工况下不存在，但仍需记录加速度计的安装位置。位置校正后的信号测量量是“侧向加速度”，因此，必须依次用车身侧倾角正弦值和路面倾斜角正弦值计算的重力加速度分量进行修正；

b) 加速度计安装在陀螺仪系统稳定的平台上，位置校正按照上述。

如上a)和b)所述，加速度计安装在汽车簧载质量上测量的是簧载质量侧向加速度。在稳态条件下，它相当于整车的侧向加速度。

高质量“伺服”加速度计具有满量程线性度为 $\pm 0.05\% \sim \pm 0.1\%$ ，0.02%的滞后及0.001%分辨率。基于光束或弹簧形变的加速度计拥有满量程 $\pm 1\%$ 的线性度。测量误差主要取决于安装条件：例如， 0.6° 的侧倾角补偿误差会导致 $0.01g$ 加速度测量误差。稳态向心加速度可以由水平速度和横摆角速度相乘得到。稳态向心加速度与侧向加速度的区别为汽车侧偏角余弦值。在数据处理中会使用修整系数，对于足够小的侧偏角 (例如 8° 的余弦值为0.99)，这些偏差可以被忽略。

当行驶在已知半径的稳态工况下，向心加速度可以通过水平速度的平方除以道路半径或者通过横摆角速度的平方乘以道路半径得到。通过这种方式计算加速度，半径应是理想参考点的曲率半径，应包括车体侧倾等在内的修正。实际上应用过程中，这些误差是可以忽略的。

注：侧向加速度是该点加速度矢量在Y方向上的分量。

C.7 车身角度

相对于重力方向的汽车侧倾角和俯仰角可以通过两轴陀螺仪测量得到，可以选择无参考陀螺仪或重力参考垂向陀螺仪。自由陀螺仪是框架结构的，不进行测量时应当锁在其壳体上。当框架结构解锁时，它在惯性空间内保持不变，能够进行汽车运动角度的测量。自由陀螺仪可以用来测量侧倾角和横摆角，或者侧倾和俯仰运动。通过主动控制慢转力矩电机作用，垂向陀螺仪相对于重力垂直方向是“竖立的”。以上两种陀螺仪都不能在长时间的稳定转向下获得所需测量的加速度。根据产品说明书，自由陀螺仪及垂直系统失效的垂向陀螺仪以最大每分钟 $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 速度“漂移”；有效安装垂直系统的垂向陀螺仪会以每分钟 $2^\circ \sim 5^\circ$ 的速率搜寻“视垂线”，它是重力和侧向加速度的矢量之和。在无侧向加速度的情况时，垂向陀螺仪的垂直精度可以达到 $\pm 0.15^\circ \sim \pm 0.1^\circ$ 。

相对于路面的汽车侧倾和俯仰角可以通过以下方法进行测量：

a) 角度测量传感器应安装在侧偏小车侧倾和俯仰平衡架上；

b) 通过超声波或光学传感器，测量位于汽车前面、后面或侧面的参考点到地面的垂向距离的变化。超声波或光学传感器达到0.5mm测量精度就足够了，路面远非平坦的，且其粗糙度不容忽视也很明显。三个汽车传感器将定义一个平面，以此来计算相对于路面的俯仰角和侧倾角。建议将超声波传感器或者光学传感器安装在尽可能远的位置以提高测量精度；

c) 车轮相对于簧载质量上下跳动的测量，主要考虑悬架连杆的影响。（该方法并未考虑轮胎变形）

在上述每一种方法中，在测试试验中无其它约束时，都可以达到其说明精度。为了获得相对于大地平面的汽车侧倾角和俯仰角，测量信号应经过道路平面相对于水平面的角度修正。

汽车侧倾角和俯仰角相对于初始测试条件的变化量可以通过角速度陀螺仪信号的积分测量得到。该方法仅适用于短期测试，这是由于包括零点漂移在内的整个信号都会被累积。

注1：具有悬置驾驶室或者单独驾驶室的汽车，会存在两个车体角度。一个是驾驶室相对于路面的车体角度，另一个是底盘相对于路面的车体角度。

注2：通过超声波传感器或光学传感器测量汽车两侧参考点相对于路面的垂向距离变化获得的侧倾角也许不同于其它方法的测量结果，该方法与汽车底盘的侧倾刚度有关。具有独立底盘或者非常长的汽车该影响尤其要注意。

根据最终用途不同，应当利用路面倾斜角修正所测得的相对于路面或者重力方向的侧倾角数据。

C.8 转向盘力矩

转向盘力矩可以通过按照产品说明书安装的力矩传感器测量，主要测量作用在转向盘上相对于旋转轴线的力矩。在一些测试中，如果转向盘惯量与原车不一致时，它的测量结果是不准确的。

C.9 车轮转向角

相对于簧载质量的车轮转向角可以通过角度传感器测量。传感器位于簧载质量及转向节总成之间，安装在车轮轮毂的轴承上，并通过允许有前/后、垂向及外倾运动的约束联接到簧载质量上；或者利用安装在转向拉杆上的线位移或者角位移传感器测量。

由悬架运动学和弹性运动学形成的前轮转向角可以通过减去转向盘转角除以总转向传动比计算得到的转向角获得。

除了四轮转向的汽车外，由悬架运动学和弹性运动学形成的后轮转向角与后车轮转向角相等。

C.10 轮胎侧偏角

轮胎侧偏角可通过光学传感器直接测量得到。另一种方法是，可以通过前后轮侧滑角减去相应的车轮转角计算获得。

C.11 汽车轨迹

汽车轨迹可以通过全球定位系统（GPS）测量得到。GPS提供一个简单的非接触的测量大地坐标系下速度以及X, Y位置的方法。采样更新速率通常为20Hz。由X, Y坐标转变为航向角可以通过后处理或者商业模块实现。一些商用模块可以提供模拟信号和数字信号输出。典型的速度测量精度可以达到0.1km/h，分辨率可达到0.01km/h。典型的距离分辨率为1cm。典型的航向角精度为0.1°，分辨率可达0.01°。轨迹可以通过X、Y方向的速度分量进行积分得到，或者直接得到X、Y方向的位移。侧偏角可以通过X、Y

方向的速度计算得到，或者通过航向角与固定在汽车上的横摆角速度陀螺仪得到的积分信号之差得到。GPS说明精度仅在稳态条件下有效。

附 录 D
(资料性附录)
模拟信号滤波：巴特沃斯滤波器

D.1 对于巴特沃斯滤波器，其衰减为：

$$A^2 = \frac{1}{1 + (f_{\max}/f_0)^{2n}} \text{ 和 } A^2 = \frac{1}{1 + (f_N/f_0)^{2n}}$$

其中：

- n为滤波器阶数；
- f_{\max} 为相关的频率范围（5Hz）；
- f_0 为滤波截止频率；
- f_N 为奈奎斯特或者“折叠”频率。

D.2 对于四阶滤波器：

- 对于 $A=0.9995$ ： $f_0=2.37 \times f_{\max}=11.86\text{Hz}$ ；
- 对于 $A=0.0005$ ： $f_s=2 \times (6.69 \times f_0)=158\text{Hz}$ ，其中， f_s 为采样频率： $f_s=2 \times f_N$ 。

D.3 在滤波器幅值特性保持平滑的频率范围内，巴特沃斯滤波器的移相 Φ 可以近似为：

- 对于二阶： $\Phi=81 \times (f/f_0)$ 度；
- 对于四阶： $\Phi=150 \times (f/f_0)$ 度；
- 对于八阶： $\Phi=294 \times (f/f_0)$ 度。

D.4 对于所有阶次的时间滞后为： $t=(\Phi/360^\circ) \times (1/f_0)$ 。

D.5 对于四阶滤波器，数据采样频率 f_s 应大于 $13.4 \times f_0$ ，如果相位误差在随后的数字数据处理中进行调节，通带频率 f_0 （从0Hz到 f_0 ）应大于 $2.37 \times f_{\max}$ ，否则应当大于 $5 \times f_{\max}$ 。其它阶次滤波器， f_0 和 f_s 的选择应使得响应曲线有足够的平坦度及抗混叠误差。