

汽车侧翻综合试验台多参数校准方法研究

□ 谢杰^{1, 2, 3}

(1.福建省计量科学研究院; 2.国家市场监督管理总局重点实验室(力值计量测试);
3.福建省力值计量测试重点实验室)

【摘要】针对汽车侧翻综合试验台的侧翻角度、水平称重准确度、法向称重准确度、质心测量准确度等参数要求高、校准难度大的问题,设计了试验方法并对设备进行校准,该方法能对试验台的综合性能进行评价,并分析了校准结果的不确定度,保证车辆相关特性测量的准确可靠。

【关键词】法向称重; 质心; 校准

引言

汽车侧翻综合试验系统是《汽车产品强制性标准检验项目及依据标准》强检项目中第58项侧翻稳

定角和第99项机动车安全运行强制性项目要求的必备设备,它的主要功能是完成车辆质心位置(三维坐标)测试,轮质量、轴质量、总质量和轴负荷率测试及其他与侧倾角-法向力相关性能的测试等。其主要组成部分如图1所示,包括主平台、液压举升系统、称重测控系统、防止车辆侧滑机构、角度测量机构等。侧翻试验台测量质心利用质量反应法,具有多个称重支撑平台。目前,侧翻试验台的技术水平可达到称重精度 $0.1\%F.S \pm 1e$,角度测量准确度 $0.1 \pm 1e$,质心位置测量重复性准确度可达1%。

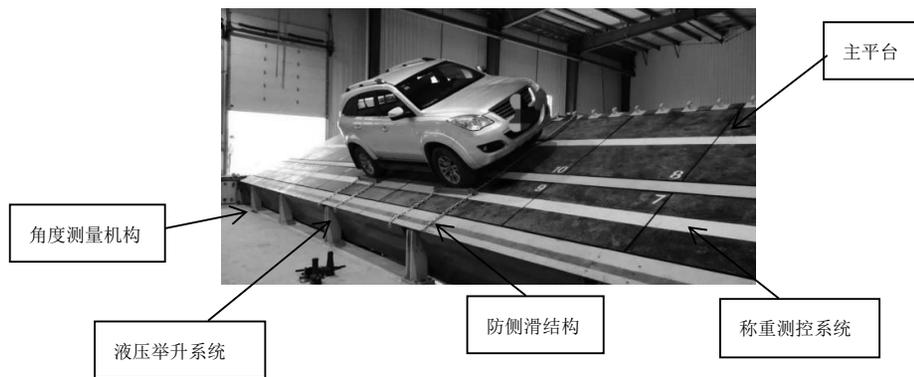


图1 汽车侧翻综合试验台

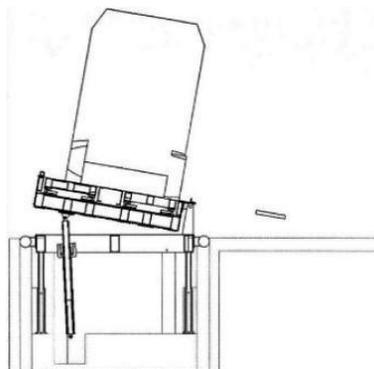


图2 汽车侧翻综合试验台结构图

在车辆使用中，使用侧翻试验台测得的各项参数在很大程度上影响车辆的性能，特别是改装后的专用汽车，车载专用设备对车辆质心影响十分巨大，易造成车辆操纵特性、行驶特性的重大变化，进而影响安全，因此准确测量相关参数和对测量设备进行校准是十分必要的。汽车侧翻稳定角和质心位置的测量准确度严重依赖其法向称重的准确度。但是出于种种考虑，目前国内相关机构均未对侧翻试验台的侧翻法向称重、质心测量准确度等进行校准，仅使用水平称重校准的数据进行推算，其准确度无法反映倾斜状态下设备的称重能力。

因此，本文设计了一种基于分布式可变质量的综合校准方法，实现对汽车侧翻综合试验系统的角度称量准确度、水平称重准确度、法向称重准确度、质心测量准确度进行综合评价，并对校准结果进行不确定度评定和分析。

1 校准系统组成

本文所述的校准系统是针对某型号汽车侧翻综合试验系统设计的，系统具有20个称重台面，最大侧翻测量范围为60t，最大侧翻角为50°，单板侧倾最大秤量为3000kg。设计的校准系统由角度校准装置、标准砝码、标准质心样件装置、侧向力消除装置、位置测量装置等组成，如表1所示。

表1 校准系统组成（设备表）

序号	名称	测量范围	准确度
1	电子倾角仪	(0~90)°	±0.1°
2	砝码	1000kg	M1 等级
3	标准质心样件	/	/
4	侧向力消除装置	/	/
5	全站仪	(0~360)° (0~2000) m	II 级

校准系统中的标准质心样件装置是由经三点支撑质量反应法确认过质心位置的一组标准砝码组成。布置三只称重传感器（准确度优于0.016%），测量出加载标准砝码前后称重传感器的受力变化，通过力矩平衡公式，即可以计算出标准质心样件的二维质心位置x和y。将样件绕其轴心线(X轴)旋转90°，即可采用与Y向质心测量方式的计算公式（1-3），得到质心高度z。

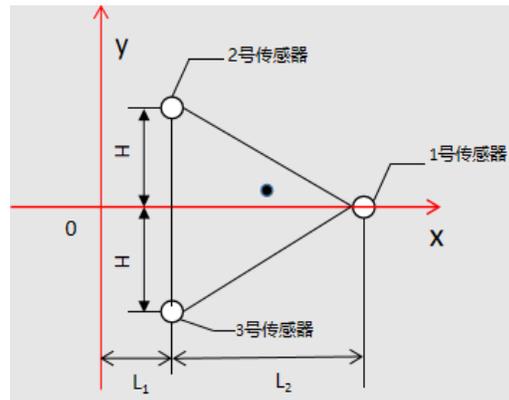


图3 三点质量反应法质心测量原理

$$m = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1-1)$$

$$x = L_1 + \frac{P_1}{m} L_2 = L_1 + \frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3} L_2 \quad (1-2)$$

$$y = \frac{P_2 - P_3}{m} H = \frac{P_2 - P_3}{P_1 + P_2 + P_3} H \quad (1-3)$$

（其中：m为砝码质量；P₁、P₂、P₃为各称重传感器质量分量。x为X向质心坐标；y为Y向质心坐标；L₁为定位基准到传感器2、3支点距离；L₂为称重传感器2、3支点与称重传感器1支点在z向投影的距离；H为称重传感器2、3支点在Y向投影距离一半。）

在校准侧倾法向称重准确度时，校准使用的标准砝码可能在侧向力的作用下克服接触面间的静摩擦力发生滑移，从而移出称重台面造成校准不准或发生安全事故。侧向力消除装置如图4所示，由防滑板、柔性约束带、水平测量装置组成，连接在侧翻试验台的挂钩处，应能防止倾斜状态下砝码发生位移，同时使用水平测量装置保证约束带与称重平面的平行，使侧向力作用在称重平面内，不影响法向称重。

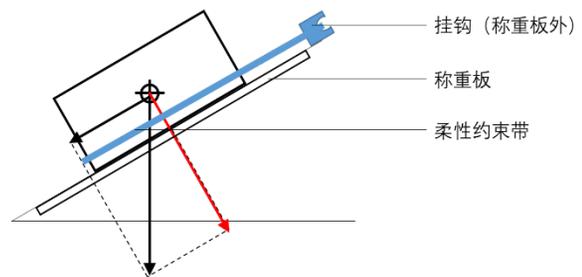


图4 侧向力消除装置原理

2 校准原理和步骤

2.1 运动范围/角度测量范围/角度测量准确度

将3台数显倾角仪分别安装在侧翻台的纵梁上表面的不同位置,采取磁力等固定措施使其在校准期间不与台面发生相对位移,并确保倾角仪与侧翻台旋转轴线垂直,垂直度不小于垂直度公差H等级。在空载状态下,在侧翻台全运动范围内操作侧翻台侧倾,到达校准点时锁止并使侧倾角度保持稳定,分别读取系统测量的角度示值 y_i 和倾角仪示值 R_{ij} 。校准点包括 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 为一个循环,校准共进行3个循环。检查运动范围、角度测量范围是否覆盖 $0^\circ \sim 50^\circ$ 。三台数显倾角仪在同一校准点的读数平均值计算为:

$$\bar{R}_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 R_{ij} \quad \text{---(2-1)}$$

示值误差计算为:

$$\theta = \frac{(R_i - y_i)}{y_i} \theta = \frac{(y_i - \bar{R}_i)}{\bar{R}_i} \quad \text{---(2-2)}$$

倾斜称重检测重复性误差计算为:

$$s = (\bar{R}_{i_{max}} - \bar{R}_{i_{min}}) / 2.70 \quad \text{---(2-3)}$$

2.2 侧倾称重准确度

在空载状态下,在侧翻台全运动范围内操作侧翻台侧倾,在各个倾角校准点读取法向力称重示值 P 。将不同质量砝码放置在称重板平面内并使用防滑装置柔性约束,使用水平仪测量并调节防滑板和约束链高度确保约束反力与称重板平面平行,且约

束力施加在称重板外,将数显倾角仪安装在被测称重板上表面。在侧翻台全运动范围内操作侧翻台侧倾,在各个倾角校准点读取砝码质量 m 、法向力称重示值 P 和倾角仪示值 θ 。校准对全部20块称重板进行,每块称重板的最大校准质量3000kg,倾角校准点包括 0° 、 23° 、 35° 、 50° (以确保安全前提下能达到的最大倾角为限),校准共进行3个循环。

侧倾状态下标准法向力计算为:

$$M = m \cos \theta \quad \text{---(2-4)}$$

示值相对误差计算为:

$$E = (P - M) / M \quad \text{---(2-5)}$$

2.3 质心位置误差/测量重复性精度

在侧翻台水平状态下,使用砝码确认每块称重板的偏载误差,如超出最大允许误差,予以调整。在侧翻台水平状态下,在选定的称重板上放置标准质心样品,测量并计算标准质心位置 (X, Y, Z) ,读取系统显示的质心位置平面坐标示值 (x, y, z) 。将不同配置方案的标准质心样品放置在称重板平面内并使用防滑装置柔性约束,使用水平仪测量并调节防滑板和约束链高度确保约束反力与称重板平面平行,且约束力施加在称重板外,将数显倾角仪安装在被测称重板上表面。使用全站仪测量标准质心样品组的质心位置,确定模拟轮距、轴距等参数,输入试验系统。质心校准方案如图5所示。

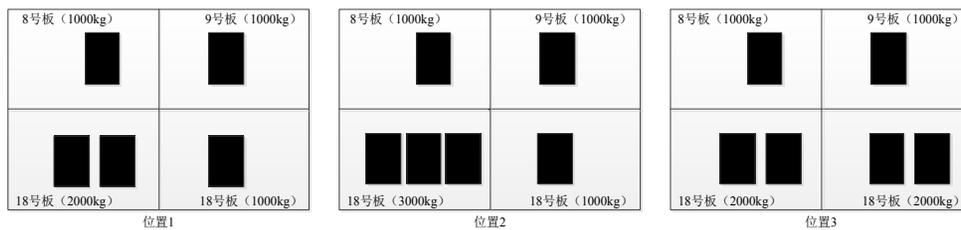


图5 质心校准方案

操作侧翻台侧倾,读取系统显示的质心位置高度示值 z 。校准时模拟多轴车辆,单称重板最大校准质量3000kg,校准共进行3次。

质心位置绝对误差计算:

$$E = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2} \quad \text{---(2-6)}$$

质心位置相对误差计算:

$$e = E / L \quad \text{---(2-7)}$$

质心位置测量重复性计算:

$$S = (E_{max} - E_{min}) / E \quad \text{---(2-8)}$$

3 校准不确定度分析

3.1 角度测量准确度校准不确定度

参考JJF1870-2020 倾斜摇摆试验台校准规范

分量:倾角仪引入的不确定度分量 $u=0.05^\circ$;

角度示值误差测量结果不确定度 $U=0.10^\circ$,

$k=2$ 。

3.2 侧倾称重准确度校准不确定度

分量：标准砝码MPE、测量重复性、仪表分辨力、偏载、环境变化（可忽略）、角度测量误差、约束带平行度测量误差（来源于水平仪误差）；

3.2.1 数学模型

$$E = P - M = P - m \cos \theta \quad \text{---(3-1)}$$

$$u^2(E) = c_1^2 u^2(P) + c_2^2 u^2(m) + c_3^2 u^2(\theta) \quad \text{---(3-2)}$$

$$c_1 = \frac{\partial E}{\partial P} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial E}{\partial m} = -\cos \theta,$$

$$c_3 = \frac{\partial E}{\partial \theta} = m \sin \theta \quad \text{---(3-3)}$$

不确定度来源：

- 1) P 重复性和分辨力5kg
- 2) M_1 等级1000kg 砝码，MPE 为50g，按均匀分布计算，砝码引入的不确定度分量为 $50/\sqrt{3}=29g$
- 3) 角度分量 $u(\theta)=0.09^\circ$

3.3 质心位置误差校准不确定度

分量：侧倾法向力误差、标准质心样品误差（称重传感器不确定度、位置测量误差）、全站仪测量误差；

3.3.1 数学模型

$$e_x = X - x, e_y = Y - y, e_z = Z - z \quad \text{---(3-4)}$$

$$u^2(e_x) = u^2(X) + u^2(x), u^2(e_y) = u^2(Y) + u^2(y), u^2(e_z) = u^2(Z) + u^2(z) \quad \text{---(3-5)}$$

$$E = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2} \quad \text{---(3-6)}$$

（其中X 为标准质心X 向坐标，x 为系统质心x 向坐标。Y 为标准质心Y 向坐标，y 为系统质心y 向坐标。Z 为标准质心Z 向坐标，z 为系统质心z 向坐标。 e_x 为标准质心与系统质心之差。）

4 校准测试结果

以某型号汽车侧翻试验系统为校准对象按照上述方法进行校准，现场校准如图6 所示，校准结果如表2 所示。



图6 校准现场图片

表2 校准结果

角度测量误差							
角度测试点 (°)	角度实测值 (°)						误差 (°)
	第1 遍		第2 遍		第3 遍		
	标准值	实测值	标准值	实测值	标准值	实测值	
0	0	-0.02	0	-0.01	0	0	-0.02
10	10.03	10.0	10.13	10.1	10.13	10.1	-0.03
20	20.07	20.0	20.03	20.0	20.32	20.2	-0.07

30	30.18	30.2	29.98	30.0	30.28	30.1	-0.05
40	40.25	40.1	40.34	40.3	40.42	40.1	-0.18
50	50.23	50.0	50.33	50.2	50.42	50.1	-0.18

侧倾角度 (°)	称重误差 (kg)		侧倾角度 (°)	称重误差 (kg)		侧倾角度 (°)	称重误差 (kg)		侧倾角度 (°)	称重误差 (kg)		侧倾角度 (°)	称重误差 (kg)	
	1号	2号		3号	4号		5号	6号		7号	8号		9号	10号
0	0	0	0	0	0	0	0	-5	0	0	-5	0	-5	0
3.11	0	0	3.21	0	0	3.05	0	0	3.09	0	0	3.12	0	0
6.12	-2	-2	6.01	-3	-3	6.1	-3	2	6.05	-3	2	6.08	-3	2
9.03	3	3	8.98	2	-3	9.1	3	-2	9.12	3	-2	9	-3	2
12.1	-2	2	12.1	2	-3	12.2	3	-2	12.15	-2	-2	12.11	-3	-3
15	-7	-2	15.1	-1	-6	15.2	0	-5	15.2	-5	-5	15	-2	-7

1号位置			2号位置			3号位置		
侧倾角度 (°)	质心位置 误差 (%)	重复性误差 (%)	侧倾角度 (°)	质心位置 误差 (%)	重复性误差 (%)	侧倾角度 (°)	质心位置 误差 (%)	重复性误差 (%)
3.2	0.04	0.06	3.2	0.49	0.80	3.25	0.01	0.02
6.35	-0.03	0.15	6.35	-0.31	0.49	6	0.02	0.03
9.15	-0.03	0.09	9.35	0.06	0.23	9.1	-0.62	0.93
12.2	0.00	0.23	12.15	0.09	0.55	12.1	0.00	0.00
15.13	-0.27	0.44	15.25	-0.03	0.44	15.2	-0.03	0.09

校准结果列表说明:

该JTF60型侧翻综合试验系统角度测量范围为(0~50)°,最大角度测量误差为-0.18°,优于±(0.1+1e),示值误差测量不确定度 $u=0.10^\circ$, $k=2$;

侧倾法向力称重最大误差为-7kg,优于±(0.1%FS+1e);

质心位置最大误差为0.62%,优于1%;

质心测量最大重复性误差为0.93%,优于1%。

5 结论

侧翻角度、质心位置等参数对于车辆的性能指标有着较大的影响,针对汽车侧翻综合试验系统参数多、影响因素多等特点,设计了汽车侧翻台校准系统。这套系统经过现场校准试验验证,可以实现对侧翻角度测量、侧倾称重、质心测量的校准。此外,本系统从设计到试验验证的过程,对研究相关测量设备的校准方法和开展现场动态校准研究具有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 刘建忠. 测试汽车质心高度的几种主要方法及其比较[J]. 辽宁交通科技, 1995-12, 18(6):43-46.
- [2] 常明. 装甲车辆质心测试系统研究[J]. 长春理工大学, 2007-3.

[3] 陆森兴. 专用汽车质心位置计算及验证方法[J]. 现代商贸工业, 2015(5):185-186.

[4] 刘明勇, 罗锋, 徐健. 质量质心测量方法及实例分析[J]. 检测与质量, 2019年(第4期):138-140.

[5] 王保贵, 张洪伟, 赵阳. 质心测量平台实现方法及精度分析[J]. 测试技术学报, 2008, 22(3):198-202.

[6] 倪栋, 王一峰. 车辆质心位置测量系统的研制[J]. 工程机械, 2011, 42(2):19-21.

[7] 王丽, 张泽光, 马晓苏. 可变质心标准样件的研究与应用[J]. 力学专业, 2018, 38:114-118.

作者简介: 谢杰 男, 汉族, 福建省福州市人, 工程师, 福建省计量科学研究院, 学士, 主要从事力值计量研究。