

文章编号: 1002-0268 (2009) 09-0136-05

# 侧撞和翻车车身被动安全性试验台的研制

徐兆坤<sup>1</sup>, 吴伟蔚<sup>1</sup>, 邓子兵<sup>2</sup>, 何稚华<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学 汽车工程学院, 上海 201620; 2. 上海大众汽车有限公司, 上海 201805)

**摘要:** 为了提高和发展汽车安全性的研究水平和能力研制了车身结构件安全性试验台。该试验台能够按照美国汽车安全法规和即将实施的国家汽车安全法规进行相关的车身结构测试。试验台具有 4 个几何参数可调性, 因此结构紧凑, 测量精度高。试验台不仅能够测试汽车车身的强度、刚度以及抗撞性能, 还可用于相当广泛的其他零部件的试验。试验台不但能测试侧门强度, 实时计算并显示平均力、最大力和被测汽车所吸收的能量, 而且采用图像测量法精确测量车身刚度, 以评价汽车安全性, 为研发提供可靠详细的依据。

**关键词:** 汽车工程; 试验台; 摄影测量学; 汽车安全性

中图分类号: U463.5

文献标识码: A

## Research and Development of Passive Safety Test Rig for Passenger Vehicle Body in Side Impact and Rollover Statuses

XU Zhaokun<sup>1</sup>, WU Weiwei<sup>1</sup>, DENG Zibing<sup>2</sup>, HE Zhihua<sup>2</sup>

(1. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Volkswagen Automobile Co., Ltd., Shanghai 201805, China)

**Abstract:** A vehicle body structure safety test rig was developed to enhance the research ability and development of vehicle safety. The developed test rig can be used to carry out all the related tests of vehicle body structure described in the American vehicle safety standards and the upcoming national vehicle safety standards. The test rig has four adjustable installation parameters, so it is compact and has a good precision. It can test not only the strength, stiffness and anti-collision characteristics of vehicle body, but also a broad range of automobile components. In addition to measure the side door strength, measure and display the mean and the maximum loading forces and the absorbed energy in real time, the device can also measure the stiffness of vehicle body by using image measurement and processing algorithms. The data can be used in vehicle safety evaluation and in following vehicle development.

**Key words:** automobile engineering; test rig; photogrammetry; vehicle safety

## 0 前言

汽车碰撞安全性研究已成为汽车安全研究领域的重要内容。目前, 各国所进行的各种汽车碰撞试验主要是确定在碰撞过程中影响乘员生命安全的关键因素, 包括车身刚度和强度<sup>[1, 2]</sup>、碰撞过程中的碰撞能量等, 其目的是提高碰撞过程中汽车对乘员的保护能力以及通过试验结果分析优化现行汽车安全法规<sup>[3]</sup>,

最终达到提高汽车碰撞的兼容性<sup>[4]</sup>。

数字摄影视觉测量技术以其测量过程中的非接触性和高效性而得到各行业的广泛应用。近年来, 高分辨率、高信噪比的数字成像 CCD 器件发展迅速, 如 MegaPlus 6.3i 数字摄像机具有 3 000 × 2 000 像素和 10 bit 的信号动态范围, 加之计算机图像处理和模式识别技术的快速进步, 使得数字摄影视觉测量技术成为目前最有前途的一种现场精密三维坐标测量技术。

收稿日期: 2008-02-28

基金项目: 上海市重点学科建设项目资助 (T1405); 上海高校知识创新工程 (085 工程) 建设项目资助 (JZ0901)

作者简介: 徐兆坤 (1953-), 男, 上海人, 教授, 研究方向为车辆工程、内燃机. (xuzhaokun1@sina.com)

本文根据乘用车碰撞规律研制了用于测试汽车车身及相关零部件(主要是侧门和车顶)的强度、刚度以及抗撞性能的车身结构件碰撞试验台,并且采用数字摄影视觉测量技术测量车身刚度(变形矢量)。不仅可获得特征点的绝对变形矢量,而且也能获取不同特征点之间的相对变形量,以评价其安全性,为研发提供可靠详细的依据。

## 1 试验台总体设计

分别依据美国 FMVSS 214 和 216 试验标准确定试验台总体设计方案如图 1 所示(加载器为半圆柱体,用于侧门测试情况,更换加载器可以用于车顶等其他部件的试验)。加载器行程可达 600 mm,冲击力可达 100 kN。试验台配置了:

(1) 加载系统,即 MTS Microconsole 458.X 控制器和 Flex Test II 试验控制与管理及数据采集系统,MTS 公司液压伺服系统的压力源和液压促动器;

(2) 控制系统,控制加载系统和数据采集与处理的动作及其同步(包括 CCD 摄像机、同步继电器开关、同步闪光灯等);

(3) 数据采集与处理系统,即视频采样数字化、压缩、图像分析、数据处理及结果输出等管理系统,控制摄像系统和照明系统。

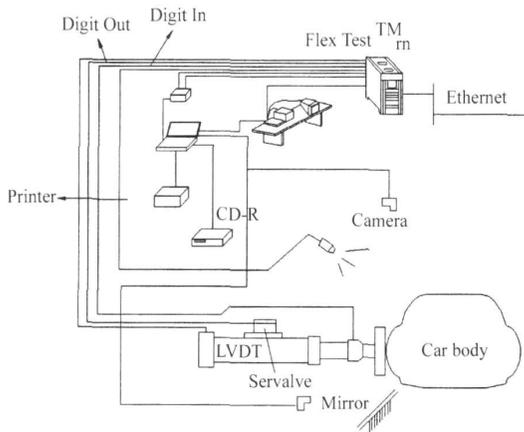


图 1 试验台总体方案

Fig 1 The test rig

## 2 试验台关键技术

### 2.1 动力及控制系统

由于车身,尤其侧门内部结构复杂,内有玻璃升降机构、门锁等,各处强度不一,因此,在撞击过程中,必将产生一个复杂的空间力系,包括:大小和方向难以确定的轴向力、剪力、弯矩和扭矩,分别作用于被测汽车和加载器上。作为动力源的液压推柱(如

图 2 所示)只能承受轴向加载力  $F_d$ 。根据轴向力平衡公式:

$$F_d = F_f + F_c, \quad (1)$$

式中,  $F_c$  为作用在汽车上的 Y 方向车身变形反力;  $F_f$  为轴向摩擦力。

只有当  $F_f \rightarrow 0$ , 才能使  $F_d \approx F_c$ , 使测试数据较真实反映汽车实际撞击。因此试验台必须设计一个导向支承装置,以吸收除轴向力以外的所有力、力矩,并且轴向摩擦力  $F_f$  应尽可能小。于是汽车在撞击的任意行程  $S$  或者任意时刻  $t$  所吸收的能量  $E_c(s)$  为:

$$E_c(s) = \int_0^s F_c ds \approx \int_0^s F_d ds = f(s), \quad (2)$$

$$\text{或者 } E_c(t) = \int_0^t F_c U dt \approx \int_0^t F_d U dt = f(t), \quad (3)$$

式中,  $U$  为加载器的加载速度。

图 2 所示为试验台主台结构示意图,图中未显示动力源,加载器为车顶试验时所用。

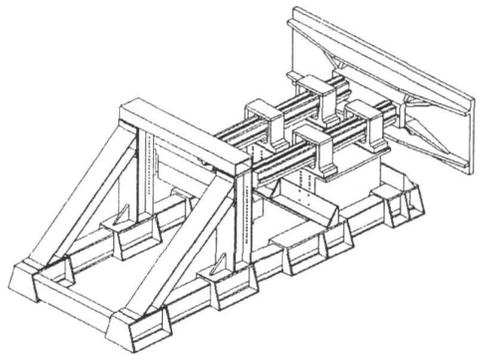


图 2 试验台主台结构示意图

Fig 2 Main body structure of the test rig

因此加载系统在软件支持下,可实时采集,并在显示屏上显示撞击行程  $s$  或时刻  $t$  时冲击力  $F$  和汽车所吸收的能量  $E$  的曲线和数值。图 3 为 3 种车型试验参数,即  $F$  与  $S$  的变化曲线,图 4 为 3 种车型试验过程第 1 阶段平均力 1、第 2 阶段平均力 2 和最大力的实测值和标准值的对比。其中车型 1、2 分别安装了防撞杆 A、B,而车型 3 没有安装防撞杆。

### 2.2 试验台调整系统和刚度保证

设备过于庞大必然会造成加工困难,且因刚度不足而影响测试精度。因此,本文采取积木式设计,即将试验台分解为 6 部分,即 1 个主台(安装动力源、导向支承装置等)、4 个轮毂定位装置和 1 个刚体铅垂平面组合挡块,分别固定于网格状大平台上,导向支承装置采用运动型滚动直线导轨,并与促动器并联布置,促动器(图中未表示)布置在 2 直线导轨之间,使主台尺寸大大减小,提高了试验台的紧凑性、

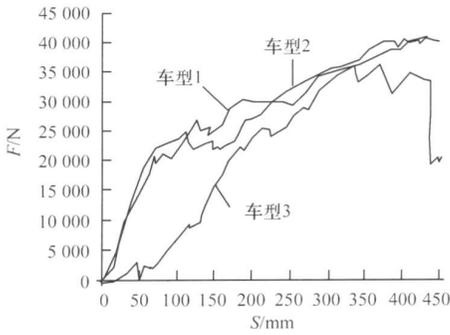


图3 3种车型的实测位移 S 与撞击力 F 的变化曲线

Fig 3 S-F curves of 3 types of vehicle

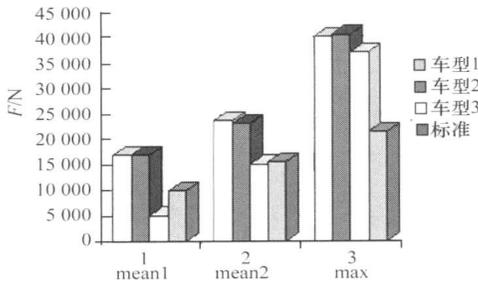


图4 3种车型的实测值和标准值的比较

Fig 4 Comparison of measured values and criteria of 3 types of vehicle

刚度和测试精度。

车身相对于促动器及加载器总成需要三维方向上的平动调整以及绕铅垂轴 Z 旋转可调, 即四维可调自由度。如果将积木式试验台系统设计成 4 个几何参数可调的话, 不但制造工艺复杂、设备庞大、成本昂贵, 而且可调装置刚度很难满足测试要求。

本文根据试验台的结构特点, 以“不降低刚度、方便实施”为原则, 以“需调节的方向与有刚度要求的方向相垂直”为手段将四维自由度分解。例如, 相对而言, 主台(促动器及加载器总成等)绕 Z 轴可调较困难, 而具有高度(Z 向)可调的一维自由度较易实现, 因此对总成中促动器进行 Z 方向的有级调节, 而在加载器内部采用特殊结构, 实现 Z 向(高度方向)无级微量调节, 由此在结构上保证了无论有级调节还是无级调节均不影响台架的轴向刚度。

对于车顶试验, 根据美国标准 FMVSS571. 216, 平板相对于车顶前倾 5°, 侧倾 25°, 由于本试验台为综合性试验台, 故平板式加载器为铅垂面布置, 因此车身必须做相应的调整和定位, 车身的调整定位使用如图 5 的装置, 车辆的底盘固定在调整定位装置的平面上, 5 个支架支点的移动可调整车身的侧倾和前倾。

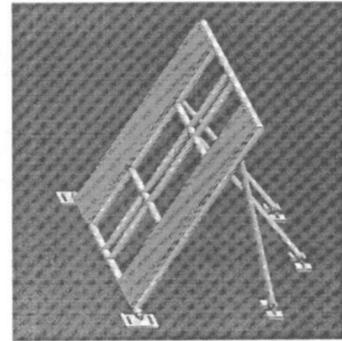


图5 车顶试验调整定位装置示意图

Fig 5 Vehicle roof adjustment device

### 2.3 加载系统和图像采集系统的同步控制

在进行汽车侧面碰撞试验时, 加载系统与图像采集系统这两个系统既没有机械联系, 也无电气或信号联系。为了使完全独立的两个系统的测量结果相互对应, 必须进行同步将它们联系在一起。当液压系统的力传感器信号超过一定阈值, 即认为加载头已与车身结构接触, 这一时刻作为液压系统力传感器信号的记录起点, 同时计算机控制系统发出信号, 使闪光灯闪光, 闪光灯形成的空白照片即可作为图像采集系统的记录起点。通过这种方式使图像采集系统与液压加载的信号系统达到同步, 有一个共同的起点, 为后续的数据分析和处理打下基础。

### 2.4 图像测量系统

序列图像运动分析方法可以较为全面地记录整个试验的动态过程, 有利于数据分析和处理。本试验台综合人体工程学、力学原理以及车身制造工艺学等因素布置车身测点, 并自主开发图像处理系统软件、硬件。图 6 为系统构成, 包括视频采样数字化、压缩、图像分析、数据处理及结果输出等管理系统, 控制摄像系统和照明系统。

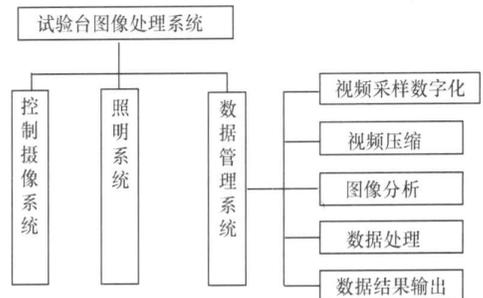


图6 试验台图像测量系统图

Fig 6 Image measurement system

根据摄影测量的原理, 一个点的空间坐标 (X, Y, Z) 与它在像平面上的坐标 (u, v) 之间通过直

接线性变换 (DLT) 联系在一起:

$$u = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (4)$$

$$v = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (5)$$

其中, 参数  $L_1$  到  $L_{11}$  反映了物方坐标系和像平面之间的相互关系。这些参数应该在测量前的标定过程中确定, 由于有 11 个未知数, 而 1 个标定只含有 2 个关系式, 所以至少需要 6 个标定点的  $(X, Y, Z)$  和  $(u, v)$  才能通过最小二乘法完成标定, 即确定  $L_1$  到  $L_{11}$ 。考虑到光学误差等因素, DLT 变换有很多包含更多参数的修正变换, 采用这些变换需要更多的标定点。通过实测发现, DLT 的测试精度已能满足要求。

很显然一个像平面上的  $(u, v)$  可以对应无数多个空间点的  $(X, Y, Z)$ , 因此无法根据一张图片反求测量点的物方坐标。所以应该布置 2 个或 2 个以上互相不平行的摄像机, 这样对于一个测量点, 就有  $(u_1, v_1)$ 、 $(u_2, v_2)$  甚至更多的像坐标, 代入上面的公式使用最小二乘法就可以解出测量点的物方坐标  $(X, Y, Z)$ 。计算测量点的一系列物方坐标就获得了这个点的变形轨迹。

使用图像测量系统实现车身标识点的三维测量过程<sup>[5]</sup>如图 7 所示。布置 2 台摄像机同时从两个不同方向对目标进行摄像; 通过视频文件格式的解析, 实现图像帧的提取, 然后应用数字图像处理算法对图像帧进行灰度化。由于在汽车碰撞试验中灯光效果和周围台架设备等因素的影响, 使得图像背景比较复杂, 采用单一的图像处理算法很难对车身标识点进行识别和提取。本试验台采用帧差分<sup>[6]</sup>以及彩色图像分割等算法, 实现车身标识点的提取, 并且利用目标的相关性<sup>[7]</sup>, 跟踪和定位序列图像中的标识点, 即提高处理效



图 7 三维测量实现过程

Fig 7 Process of 3-D measurement

率, 又提高了识别的精度。为了解决同名点的匹配问题, 试验台的车身标识点采用编码标志<sup>[7]</sup>的方法, 实现同名点的自动匹配, 提高了测量的自动化操作。

实现的图像三维测量法精确测量车身刚度(变形矢量), 即任意时刻特征点的三维坐标。因而不仅可获取特征点的绝对变形矢量, 而且也能获取不同特征点之间的相对变形, 以便进行进一步处理, 如应力分析。而 Audi 公司的拉线式传感器仅能测量主变形方向上的一维变形

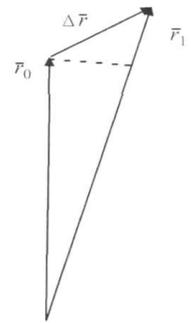


图 8 变形矢量示意图

量, 如图 8 所示。其中:  $\bar{r}_0$  为初始(变形前)位置矢量;  $\Delta \bar{r}$  为实际变形矢量;  $\bar{r}_1$  为变形后位置矢量。而 Audi 公司的测量变形为:  $\|\bar{r}_1\| - \|\bar{r}_0\|$ 。显然, 如果横向位移较大, 这种测量方法的误差是很大的。而且难以得到不同特征点之间的相对变形, 因而很难对数据进行进一步处理。

### 3 应用实例

利用图像测量系统对碰撞试验视频文件进行分析和处理, 图 9 为其中一个车身标识点在三维方向上的位移曲线图。由图可知, 在碰撞试验进行到后半段时, 位移变化趋势加快, 曲线变陡, 曲线曲率增加, 这是因为试验车辆侧门在受到加载器作用下, 弹性变形阶段结束, 塑性变形开始, 而且车门也开始出现塌陷。从视频图像帧可见, 试验车辆在第 15 s 的时候, 车窗玻璃破裂, 车门开始塌陷, 与该点位移曲线变化规律相对应, 该点 Z 方向的位移曲线在 15 s 左右曲率突然增加; 在试验进行到后半段, 该点位移较试验的前半段时间内变化明显, 这也与该点的位移变化曲线相符合。

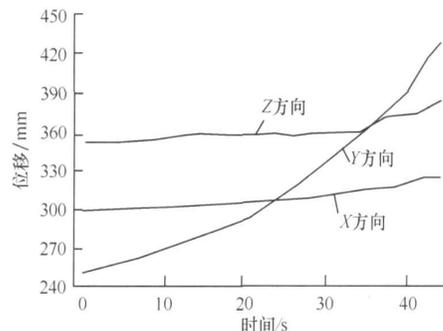


图 9 标识点位移曲线图

Fig 9 Displacement curves of identification points

## 4 结论

本文首次将图像技术、影像测量学理论与传感器技术、液压及控制技术、车身设计和试验学等不同学科相结合, 综合应用于乘用车车身结构件安全性试验台, 采用了国内没有的、与国外先进技术不同的, 标准摄像的图像三维测量法代替传感器一维测量法, 使试验台不但能测试侧门强度(冲击力  $F$ 、撞击行程  $S$ ), 实时计算并显示平均力、最大力和被测汽车所吸收的能量  $E$ , 而且能精确地测量车身刚度(变形矢量)。并且在相互独立的加载系统和图像系统之间以光作为媒介建立了联系。以更低的成本, 更丰富的信息, 更高的精度同步获取了车身各处的变形矢量、冲击力、被测车辆所吸收的能量和对人体伤害的信息。

### 参考文献:

#### References:

- [1] GEOFFREY J, TYLER S, KEVIN C. Side Impact Motor Vehicle Structural Characteristics from Crash Tests [J]. SAE Paper, 2003- 01- 0495.
  - [2] YUICHI K, MASASHI M, CHINMOY P. Evaluation and Research of Vehicle Body Stiffness and Strength for Car to Car Compatibility [J]. SAE Paper, 2003- 01- 0908.
  - [3] DIETMAR H, THOMAS S, GARETH T. Feasible Steps Towards Improved Crash Compatibility [J]. SAE Paper, 2004- 01- 1167.
  - [4] PASCAL D, JACQUES F, DONAT C. New Barrier Test and Assessment Protocol to Control Compatibility [J]. SAE Paper, 2004- 01- 1171.
  - [5] JUSTIN M, CHIN H. Automated Trinocular Stereo Imaging System for Three-dimensional Surface Wave Measurements [J]. Ocean Engineering, 2006 (6): 723- 747.
  - [6] MEHRUBE M, LIFFORD M. Determination of Traffic Intensity from Camera Images Using Image Processing and Pattern Recognition Techniques [C] // Real-Time Image Processing 2006, 6063: 217- 228.
  - [7] ZHONG Sidong, GAO Zhi. Automatic Recognition of Coded-Pattern by Using Image Cross-Correlation [C] // SPIE, Machine Vision 2005.
  - [8] 张学民. 两步法摄像机标定的改进 [J]. 兵工自动化, 2006, 25 (9): 73- 76.
  - [9] ZHANG Xuemin, SONG Shuwen. Improvement of Two-stage Camera Calibration [J]. Ordnance Industry Automation, 2006, 25 (9): 73- 76.
  - [10] RAFFEL M, WILLERT C, KOMPENHANS J. Particle Image Velocimetry: A Practical Guide [M]. Berlin: Springer, 1998.
  - [11] MICHAEL P. Camera Calibration: a Quick and Easy Way to Determine the Scale Factor [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13 (12): 1240- 1244.
- (上接第 135 页)
- [2] LIN K Y, HWANG J R, CHANG S H. System Dynamics and Ride Quality Assessment of Automobile [J]. SAE Paper, 2006- 01- 1225.
  - [3] 李军, 邢俊文, 覃文洁, 等. ADAMS 实例教程 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
  - [4] LI Jun, XING Junwen, TAN Wenjie, et al. Course of ADAMS Examples [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.
  - [5] 管西强. 基于多体理论的城市客车空气悬架系统分析与实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
  - [6] GUAN Xiqiang. Multi-body Theory Based Analysis and Experiment of Air suspensions for City Buses [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2004.
  - [7] 李志鹏, 郭艳玲. 基于柔体动力学分析的平面并联机器人结构优化设计 [J]. 机械设计, 2006, 23(7): 19- 21.
  - [8] LI Zhipeng, GUO Yanling. Structural Optimization Design of Planar Parallel Robot Based on Dynamics Analysis of Flexible Body [J]. Machine Design, 2006, 23 (7): 19- 21.
  - [9] 张健文. 空气弹簧非线性有限元分析和空气悬架大客车隔振性能的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2003.
  - [10] ZHANG Jianwen. Non-linear Finite Element Analysis on Air Spring and Study on Isolation Performance of Commercial Car with Air Suspension [D]. Changchun: Jilin University of Technology, 2003.
  - [7] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
  - [8] YU Zhisheng. Automobile Theory [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
  - [8] MARIMUTHU R P, JANG B C. A Study on SUV Parameters Sensitivity on Rollover Propensity [J]. SAE Paper, 2006- 01- 0795.
  - [9] 刘善维. 机械零件的可靠性优化设计 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
  - [10] LIU Shanwei. Reliability Optimization Design of Mechanical Parts [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1993.
  - [10] DORA B K, ANAND R B, SINGANAMALLI A, et al. Optimization of Frame Design through Virtual Simulation of Bump Test [J]. SAE Paper, 2004- 32- 0021.