文章编号:1674-2974(2024)10-0001-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024194

面向滑台试验的乘员体压采集系统设计与应用

白中浩[1†],王博韬[1],费敬[2],刘煜[2],王沛丰[2],黄沛丰[1]
(1. 湖南大学 整车先进设计制造技术全国重点实验室,湖南 长沙 410082;
2. 中国汽车工程研究院股份有限公司 汽车安全技术中心,重庆 404100)

摘 要:为了满足汽车碰撞滑台试验瞬时、大冲击工况下的乘员体压数据连续、高速采集需求,设计了一套基于STM32H723ZGT6高性能MCU和阵列压力传感器的高速乘员体压采集系统.提出高性能硬件、本地采集、本地存储、试验后上传的设计方案,应用高性能微控制器和内存扩展的方式提高数据采集实时性、稳定性,对坐垫、靠背共4 576个力敏点数据的采集频率能够达到200 Hz,满足滑台试验数据采集需求,同时能够控制系统成本.提出一种基于单通道图像特征提取的乘员体压数据分析方法.在刚性座椅滑台试验中,志愿者在4种座椅状态下,对乘员体压数据进行采集,获取乘员骨盆滑移轨迹、最大滑移量、最大窗口压力均值及其电压变化趋势、坐垫全域和3个子区域重量变化趋势并进行数据可视化,所获数据特征与高速摄像获得的乘员姿态响应基本相符.

关键词:压力测量;数据分析;滑台试验;乘员
中图分类号:U467.5 **文献标志码**:A

Design and Application of Passenger Body Pressure Acquisition System for Sled Testing

BAI Zhonghao[1†], WANG Botao[1], FEI Jing[2], LIU Yu[2], WANG Peifeng[2], HUANG Peifeng[1]
(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Automotive Safety Technology Center, China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

Abstract: To meet the requirements of continuous and high-speed data acquisition of passenger body pressure under instantaneous and high-impact conditions in automotive collision sled tests, a high speed passenger body pressure collection system was designed based on STM32H723ZGT6 high-performance MCU and array pressure sensor, where the design scheme included high-performance hardware, local data acquisition, local storage, and post-experiment uploading. By applying high-performance microcontroller units and memory expansion, the real-time performance and stability of data collection have been improved. The data acquisition frequency for 4 576 force-sensitive points on both the seat cushion and backrest could reach 200 Hz, satisfying the data acquisition requirements for sled tests while also controlling system costs. Additionally, a passenger body pressure data analysis

* **收稿日期**:2023-12-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52307240), National Natural Science Foundation of China(52307240);广西科技重大专项(桂科AA23062083),Guangxi Major Science and Technology Project (桂科AA23062083)
作者简介:白中浩(1978—),男,河南商丘人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: baizhonghao@hnu.edu.cn

method based on single-channel image feature extraction was introduced. In rigid seat sled tests, data on passenger body pressure were collected from a volunteer under four different seat conditions. The passenger's pelvic displacement trajectory, maximum average rectangular window pressure, voltage variation trend, and weight change trends for the entire seat cushion and its three sub-regions were obtained and visualized. The obtained data characteristics are essentially consistent with the passenger posture responses obtained by the high-speed camera.

Key words: pressure measurement; data analytics; sled test; passengers

随着经济的快速发展,汽车保有量不断上升,汽车被动安全备受关注,其研究方法一般为碰撞试验、理论研究和有限元仿真.其中,实车碰撞试验存在试验周期长、费用高、风险大等缺陷.为了解决上述缺陷,滑台试验被广泛用于约束系统匹配测试、FarSide远端乘员保护试验、Whiplash座椅鞭打试验、Knee Mapping试验以及新型约束系统零部件开发试验中.

姿态数据的获取有基于视觉[1-3],基于可穿戴传感器[4],基于RFID[5]等方法.传统滑台试验采用了前两种方法,其设备由位于滑台两侧和头顶的高速摄像以及布置于试验对象头颈部的x、y、z方向加速度传感器组成,用于获取试验对象在碰撞过程中的瞬时姿态数据.但该系统无法获取碰撞过程中乘员和座椅之间的相互作用关系,进而评估座椅本身对乘员的保护效果.目前,已有座椅、安全带厂商及检测机构将压敏纸应用于试验中,以获取乘员体压分布数据.通常但压敏纸响应速度相对较慢,在高频率的动态压力变化下无法准确测量,且所有时刻的压力特征成像在一张纸上,后期无法拆分成单帧图像.而将基于压力传感器阵列的体压采集系统用于滑台试验可有效避免上述压敏纸存在的问题.

国内外许多学者已在汽车、医疗等行业就体压采集系统的开发和应用展开了深入研究.宋国印等[6]基于动作捕捉系统和触觉传感器设计了被护理人姿态识别系统.石萍等[7]基于六个单点阵列压力传感器设计了一套布置于坐垫的褥疮防治系统.裴卉宁等[8]通过Tactilus压力分布测量系统对受试者接触面积、接触压强、峰值接触压强进行分析进而对汽车座椅材质进行舒适性优化.Ran等[9]用IM00014柔性传感器、数据采集卡、树莓派搭建系统,并比较了支持向量机、随机森林等7种机器学习算法在坐姿识别中的效果.陈浩川等[10]基于STM32F1芯片和织物传感器设计坐姿压力采集系统,并通过mVGG-FCN深度学习算法对坐姿进行分类.孟站领等[11]通过足底压力测试系统,获取足底压力峰值区域、冲量、接触面积、压力中心轨迹等特征,对老年人跨越步态进行分析.杨先军[12]基于柔性阵列传感器设计了一套用于数字化跑道运动员足底动力学信息获取的压力采集系统,并针对压力传感器阵列测量中的耦合现象对比了二次测量和常用测量两种解决方法.陈飞[13]根据驾驶员体压分布对座椅乘坐舒适性展开了研究.郭立泉等[14]基于STM32F1系列高性能微控制器(Microcontroller Unit,MCU)设计了一套可用于坐卧以及足底压力测量的高速数据采集系统.杨镇海[15]基于FSR406传感器开发了驾驶员行为检测系统.岳尚军[16]基于柔性压阻薄膜,采用STM32F4系列MCU设计压力分布测量系统采集卡.刘键等[17]基于Tekscan座椅压力分布测量系统,获取志愿者在不同座面、靠背角度的压力加权平均值、总接触面积、分布指数,并结合主观感受对座椅睡眠舒适度进行验证.Zhao等[18]通过两个42×44的阵列传感器分别获得靠背和座椅底板的压力云图,经过拼接和转换后输入网络训练驾驶员坐姿分类器.此外,该团队基于体压分布定义的44个参数形成两个特征向量,分别对随机森林分类器进行训练以用于坐姿识别.Riener等[19]将压力阵列传感器集成到座椅织物中,提出了一个基于靠背-坐垫压力分布特征的坐姿识别系统.Park等[20]将座椅和靠背中的压力传感器阵列划分为17个区域,分析测得压力数据的平均压力、接触面积和身体部位压力比,用于评估驾驶员工作空间和座椅的舒适度.Fenety等[21]将压力传感器阵列用于跟踪臀部压力中心,从而评估人体坐姿舒适性.

现有研究大多面向相对静态的体压采集场景,

对系统的数据采集速率要求并不高.即使是坐卧、足底压力高速数据采集系统[14],2 288 个数据点规模的压力云图采集速率只能达到 10 ms/帧,若在靠背和坐垫处采用两片相同规模的传感器,采集速率将进一步降低到 20 ms/帧,而滑台试验的研究对象为碰撞过程中的乘员瞬时响应,若使用上述系统,过低的帧率会损失大量的乘员瞬时响应特征.

高性能、低功耗 MCU 的快速普及使研发低成本的高速体压数据采集系统成为可能.本研究基于 STM32H723ZGT6 高性能 MCU 和阵列压力传感器设计了一套用于滑台试验的高速乘员体压采集系统,提出一种基于单通道图像特征提取的乘员体压数据分析方法,并将该系统应用到滑台试验中.

1　系统整体设计

乘员体压采集系统包含阵列压力传感器、阵列压力数据高速采集系统、触发模块、上位机 4 个主要模块.如图 1 所示,MCU 的 DAC 模块持续产生大小可控的电压信号,当 MCU 检测到触发模块产生的高电平信号,由 IO 口控制的“被动式”扫描电路开始工作.MCU 的 ADC 模块对选通通道的电压信号进行采集.获取的压力数据可存储在高速 Micro SD 存储器中,试验结束后通过读卡器转存至上位机,也可存储至外置 FLASH 存储器中,试验结束后通过 USB 上传至上位机.系统实物图如图 2 所示.

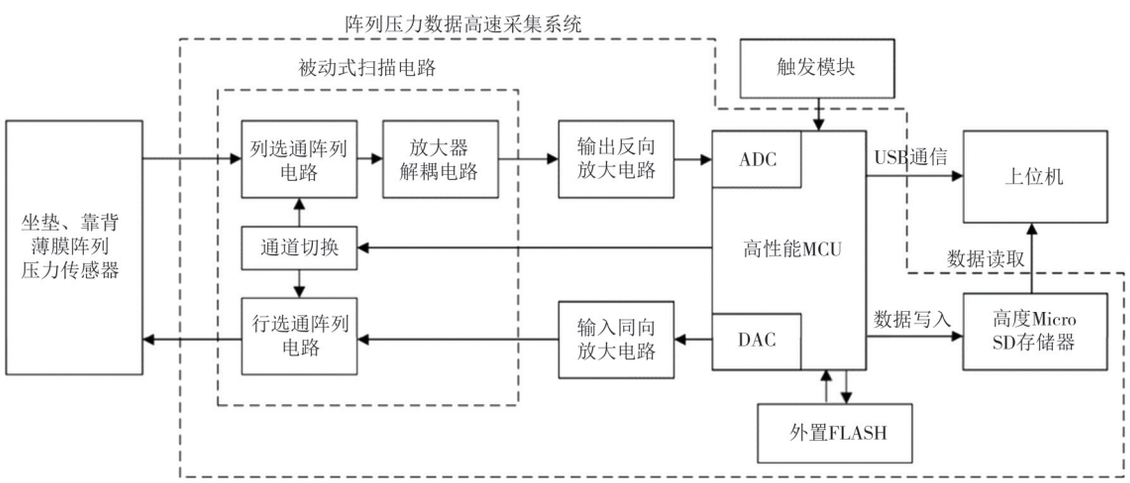


图 1　系统组成示意图

Fig.1　System composition diagram

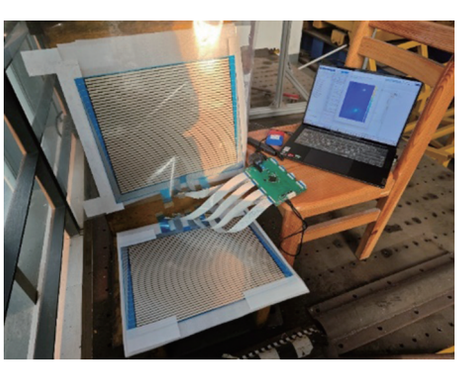


图 2　系统实物图

Fig.2　System physical diagram

2　阵列压力传感器选型

滑台试验座椅主要分为刚性座椅和汽车座椅,其中刚性座椅试验影响因素少,可重复性高,变量主要有坐垫角、靠背角、腿托,适合作标准基础研究.汽车座椅试验更贴近真实使用场景,但不同座椅型号测试偏差较大,适合指定型号座椅及其约束系统的试验.传感器选型上,刚性座椅和汽车座椅最大的区别是表面变形.

为了兼容两种不同座椅类型的滑台试验,本研究提出多种传感器方案.对于刚性座椅选用价格低廉的 44×52 和 32×32 点阵规模的聚酯印刷传感器,前者有更高的分辨率,后者在相同硬件条件下拥有更高的采样帧率.对于真实汽车座椅选用延展性更好与曲面贴合更充分的织物传感器.

3　阵列压力数据高速采集系统硬件设计

由于滑台试验所产生的大规模矩阵数据会占用大量存储空间,考虑到成本,大部分 MCU 内置

FLASH不会超过1 MB,因此,阵列压力数据采集卡常配合上位机使用,通过数据线将数据实时传输到上位机进行存储和处理.在这种数据采集策略下普通串口的传输速率会严重拖累系统采集速率,若使用并行传输方式,硬件成本会进一步提升.滑台试验是一种大冲击场景,普通电脑无法放置于滑台装置上使用,若采用文献[9]中方案,将采集卡和树莓派搭配使用,大冲击下的传输稳定性仍将成为问题,树莓派本身的售价也会带来成本的增加.

为了同时满足高速采集、高速存储、抗冲击的需求.本研究提出了高性能硬件、本地采集、本地存储、试验后上传的设计方案,最大程度降低系统复杂度,使其能够灵活部署.经测试,在使用两片44×52阵列规模传感器的情况下,该系统对坐垫、靠背共4 576个力敏点数据的采集频率能够达到200 Hz.

3.1 “被动式”扫描电路

系统采用“被动式”扫描电路,利用反向运算放大器两个输入端的虚地原理,将来自非测量点的耦合电流导向地,用高速模拟开关依次选通传感器的各个通道,电压信号经过反向输出放大器调理放大后输入主控芯片的一个ADC通道.为了使反向运算放大器正常工作,该电路采用±5 V双电源供电,输出端选择支持负电压的CD74HC4051PWR高速模拟开关.“被动式”扫描电路示意图如图3所示,其中:V_{CC}表示电压信号输入;S为模拟开关的通道;R_C、R_R、R均表示电阻,薄膜阵列压力传感器各个力敏点的等效电阻用R加上行列号表示.

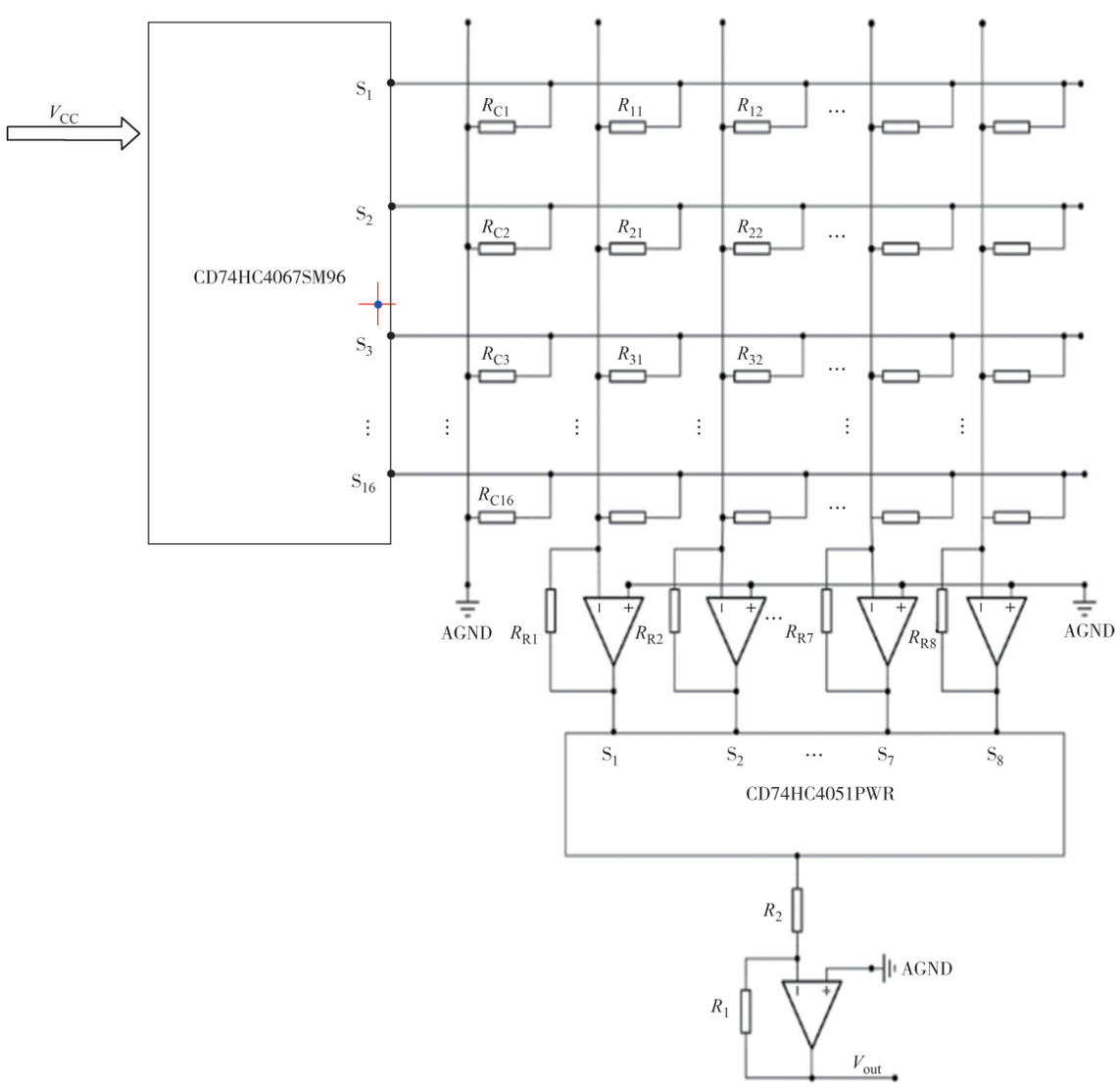


图3 “被动式”扫描电路示意图

Fig.3 Diagram of passive scanning circuit

3.2　高速采集存储电路

主控芯片选用 STM32H723ZGT6 高性能 MCU,该芯片拥有 M4、M7 高性能内核以及高达 550 MHz 的工作频率. 由于 STM32H723ZGT6 内置的 FLASH 仅有 1 MB,无法存下试验过程中产生的大量压力数据,本研究采用外置存储器的方式进行存储扩展,同时板载了 W25Q512 64MB norflash 和 Micro SD 卡槽,其中 norflash 支持 QSPI 协议,可实现 XIP 进行内存扩展,Micro SD 卡槽最高支持 32 GB 存储卡扩展,支持 SDIO-4bit 协议,理论写入速率可达 12 MB/s. W25Q512 和 Micro SD 卡扩展电路分别如图 4 和图 5 所示.

试验结束后,将采集到的数据转存到上位机. 若将压力数据存储到 Micro SD 中,可直接将 Micro SD 卡取出,通过读卡器拷贝到上位机;若存储到 norflash,可通过 MCU 自带的全速 USB 接口模拟串口或 USB 转 TTL 串口实现数据上传.

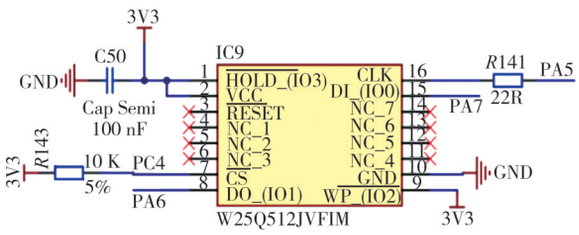


图 4　W25Q512 存储扩展电路

Fig.4　W25Q512 storage expansion circuit

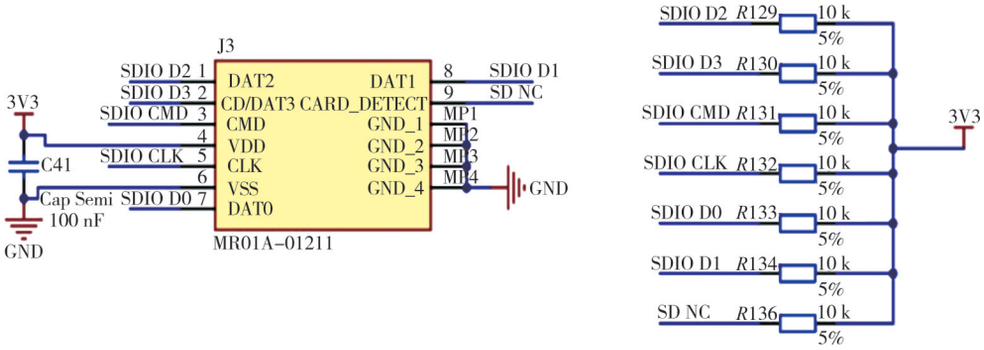


图 5　Micro SD 卡扩展电路

Fig.5　Micro SD card expansion circuit

4　数据分析方法

滑台试验主要用于乘员保护系统测试和评估,因此着重关注碰撞过程中乘员的运动响应和与座椅之间的相互作用力. 在压力分布数据中体现为时空分布特征以及数值大小. 本研究将阵列压力数据视作单通道图像,并基于图像处理的思路提出了一种乘员体压数据分析方法,从原始压力数据中提取乘员骨盆最大滑移量、滑移轨迹、离位状态、接触面压力中心分布区域以及压力峰值大小 5 个特征,沿乘员乘坐方向将坐垫划分为 3 个大小相同的子区域,如图 6 所示,分别计算坐垫全域以及 3 个子区域的压力.

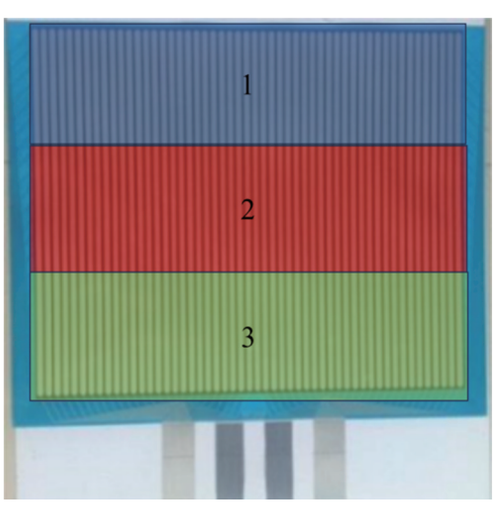


图 6　坐垫区域划分

Fig.6　Seating area segmentation

上位机数据分析程序通过 Python 和 MATLAB 编写. 数据处理流程如图 7 所示,每帧压力数据均以 txt 文件格式保存,将 txt 文件中的数据读取到二维数组中,先后进行卷积核大小为 3×3 的中值滤波和高斯滤波,分别达到去噪和平滑效果. 由于坐垫、靠背压力数值相差较大,需将两部分数据拆分后分别进行阈值处理. 坐垫数据阈值处理后用过连通区质心提取的方式获取乘员-座椅接触区域几何质心,该特征用于反映某一时刻乘员在座椅上的空间位置,通过

获取连续多帧的接触区域几何质心可得到乘员滑移轨迹并测量最大滑移量,同时用3×3大小的窗口对坐垫数据进行遍历,求得该窗口下的压力均值最大区域,进而获取压力分布中心,作用在坐垫全域和3个子区域上的压力通过压力传感器力-电阻特性曲线计算获得.靠背数据主要反映乘员的离位状态,阈值处理后若受压区域呈大面积连续形状,乘员未出现离位现象,反之若受压区域仅以噪点形式呈现或不存在,则可判断乘员出现了离位现象.靠背压力分布中心获取方法与坐垫相同.最后进行数据可视化,绘制压力云图、滑移轨迹,在压力云图中标记出压力分布中心,绘制压力分布中心压力均值变化趋势图和坐垫全域、子区域重量变化趋势图.

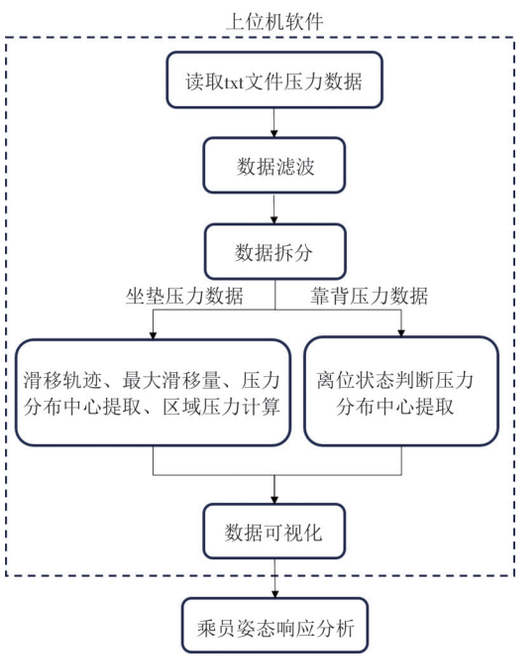


图7 数据处理流程图

Fig.7 Data processing flowchart

5 试验与讨论

5.1 志愿者滑台试验

本试验对志愿者在坐垫角15°靠背角25°无腿托、坐垫角25°靠背角45°无腿托、坐垫角25°靠背角65°无腿托、坐垫角30°靠背角65°有腿托4种座椅状态下的体压分布数据进行采集,加速度为3g,座椅为刚性座椅.传感器采用44×52聚酯印刷传感器.受条件限制,此次试验通过软件将阵列规模限制在22×26,在坐垫处仅布置了一片传感器,靠背未布置,可实现305 mm×364 mm坐垫区域的压力测量.触发方式为手动触发.安装时使薄膜阵列压力传感器与刚性座椅表面紧密贴合,试验过程中传感器不能出现窜动,阵列压力采集卡以及为其供电的12 V移动电源需在台车上采取固定措施,避免在冲击下出现窜动甚至碰撞.

5.2 压力数据采集软件

根据试验需求设计压力数据采集软件逻辑如图8所示.对系统各功能模块,包括系统时钟、DAC、ADC、各IO口、SPI、SDIO以及USB的参数进行初始化,若STM32接收到高电平触发信号,开始调用通道切换程序进行阵列扫描,STM32 ADC通道对输出的电压信号进行采集,将数据依次存储至数组中,若完成整张压力云图数据的采集,将该数组写入Micro

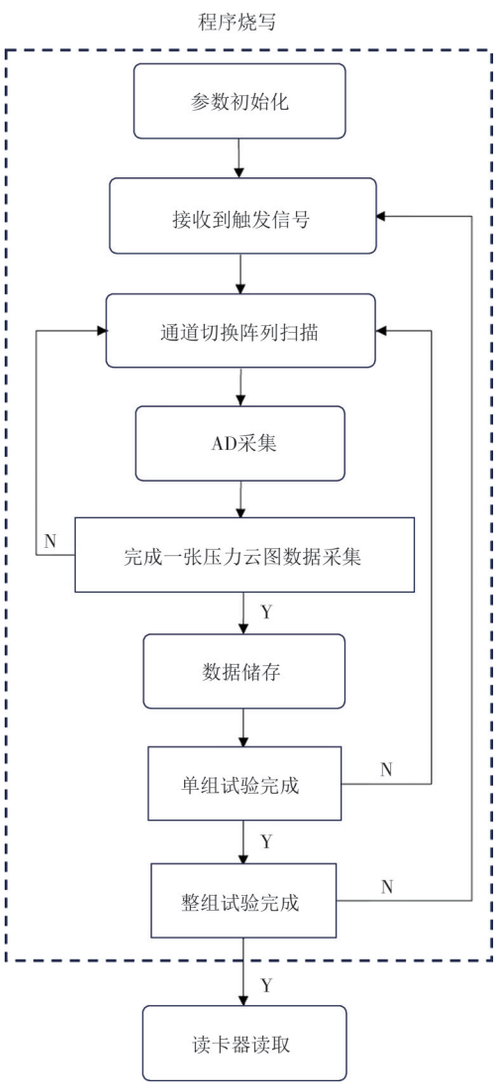


图8 压力数据采集软件逻辑

Fig.8 Pressure data acquisition software logic

SD卡,若未完成则继续对阵列进行扫描.其间对数组数量进行计数,若触发后完成了目标压力云图数量的存储,则视为单组试验完成,否则重新扫描阵列.为了不漏采数据,本次单组试验设置目标压力云图采集数量为3 000张.若该组试验是在当前座椅角度下的最后一组,取出Micro SD卡,通过读卡器将卡内数据读取到上位机中,否则等待下一个触发信号.

5.3　数据分析

提取单组试验中碰撞发生后的30组数据进行分析,数据采集时间间隔为5 ms.表1为志愿者在4种座椅状态下由高速摄像获得的股骨X方向位移和由压力分布数据获得的骨盆X方向位移,后者由人工寻找起始帧和最大位移帧,并对两帧中的特征点进行标记,通过压力像素点计数的方式获取最大位移.由阵列规模和压力测量区域大小可得通过该方式获取的最大位移误差为±7 mm,分辨率较低.股骨和骨盆X方向位移在一定程度上都可以反映乘员下潜程度,对比高速摄像数据和压力分布数据,若考虑压力云图的分辨率误差,8组数据中编号为1、2、4、6、8的5组数据,高速摄像获得的数值都落在了压力分布数据的数值区间内,另外3组数据的数值趋势也大致相同,说明采集的压力数据能够较为准确地反映乘员臀部的运动趋势.值得注意的是,受志愿者试验过程中初始坐姿、紧张程度等因素影响,同一受试者在相同座椅状态下,获得的部分试验数据之间存在较大差异属于正常现象.

表 1　试验数据

Tab.1　Test data

编号	试验条件	股骨位移/mm	骨盆位移/mm
1	坐垫角15°靠背角25°无腿托	59.98	57±7
2	坐垫角25°靠背角45°无腿托	53.06	57±7
3	坐垫角25°靠背角45°无腿托	61.29	71±7
4	坐垫角25°靠背角65°无腿托	65.77	64±7
5	坐垫角25°靠背角65°无腿托	67.50	85±7
6	坐垫角30°靠背角65°有腿托	76.94	78±7
7	坐垫角30°靠背角65°有腿托	104.44	85±7
8	坐垫角30°靠背角65°有腿托	91.21	85±7

图9和图10分别为坐垫角15°靠背角25°无腿托座椅状态下高速摄像图像和压力数据可视化结果.在图10(a)中用红色方框和蓝色方框分别标记出压力均值最大的窗口和第二大的窗口,对每帧图像下的压力集中点进行定位.图10(b)为碰撞过程中乘员骨盆滑移轨迹,滑移方向为Y轴方向,通过轨迹计算骨盆最大滑移量约为61.77 mm,与人工标记压力云图得到的骨盆X方向位移数值大小基本一致,最大窗口平均电压变化趋势如图10(c)所示.图11为4种座椅状态下1 000帧时间长度内坐垫全域和3个子区域重量变化趋势.

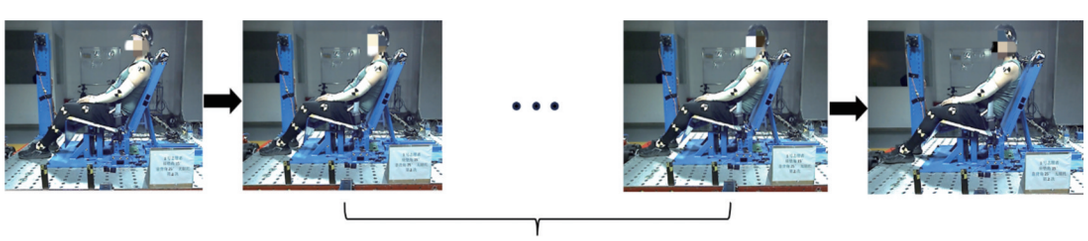


图9　坐垫角15°靠背角25°无腿托座椅状态下高速摄像图

Fig.9　Seat cushion angle 15° backrest angle 25° without leg support high-speed camera image of seat

由图10可知,碰撞发生后,压力集中区域存在向中间聚集的趋势,一段时间后会落在中间尾椎处并达到最大值.窗口压力峰值为35.83 N,计算公式如下:

$$F = 0.063\,5V_{out} - 22.638 \tag{1}$$

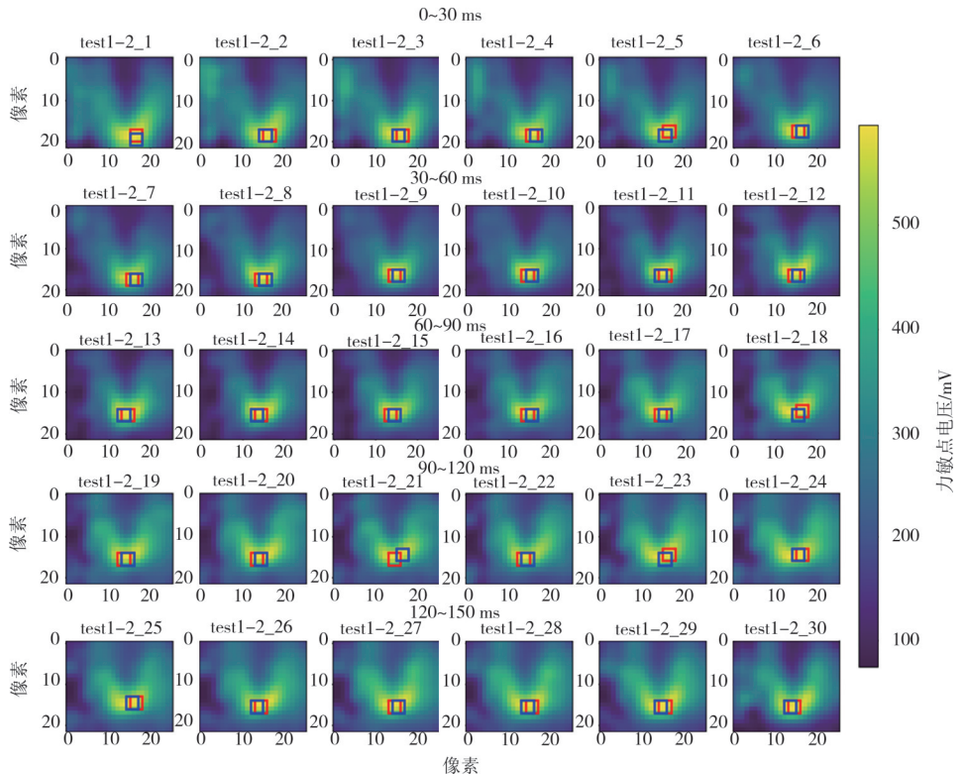
式中:输出电压V_{out}单位为mV;窗口压力F单位为N,表示作用在框选区域即3×3窗口内(41.7 mm×41.7 mm)的总压力.在本系统中V_{out}取最大值时F为最大窗口压力,该公式仅适用于本次试验使用的传感器,若需更换传感器则应根据传感器具体参数重新计算.

将图11中4种座椅状态下的坐垫区域重量变化趋势和高速摄像数据进行对比,可以得出如下结论.

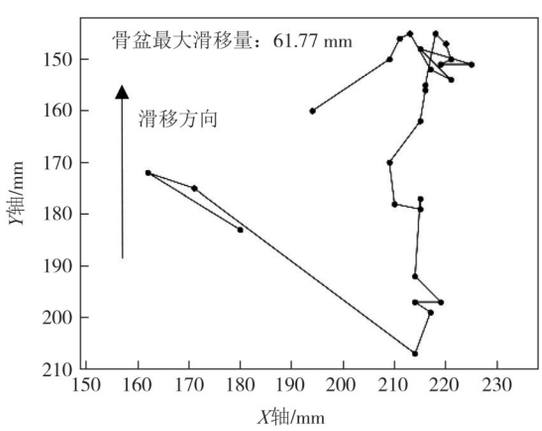
1)试验中志愿者姿态响应明显变化的阶段长约100个连续帧.

2)坐垫角、靠背角越大,坐垫承托的乘员重量越小,乘员臀部受压越小.

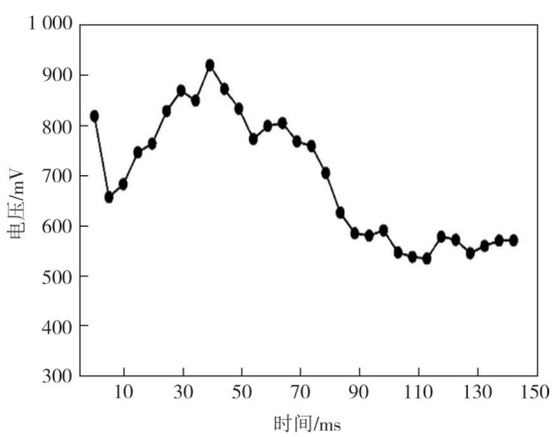
3)初始状态下,由于乘员骨盆区域与坐垫作用点靠后,区域3压力大于区域2和区域1,在滑台试验结束后乘员骨盆向前滑移,导致终了状态下区域3和区域2压力差值减小,甚至区域2压力大于区域3.



(a)压力云图



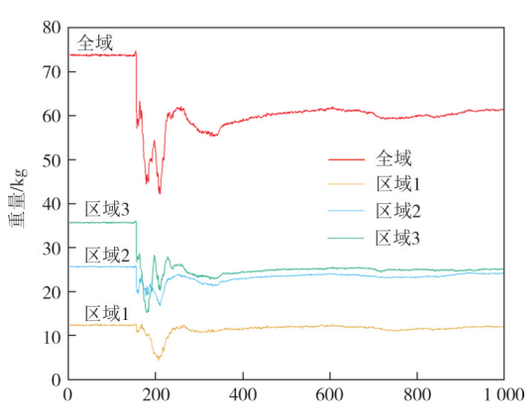
(b)骨盆滑移轨迹



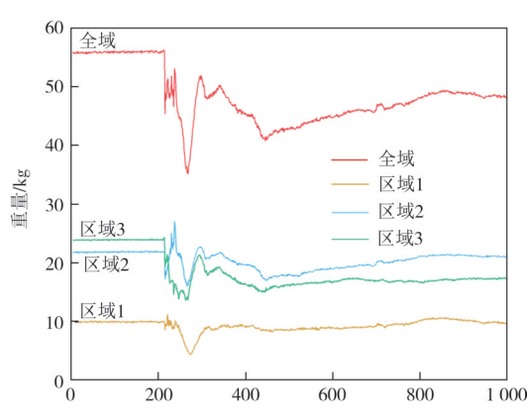
(c)最大窗口平均电压

图 10 坐垫角 15°靠背角 25°无腿托座椅状态下压力数据

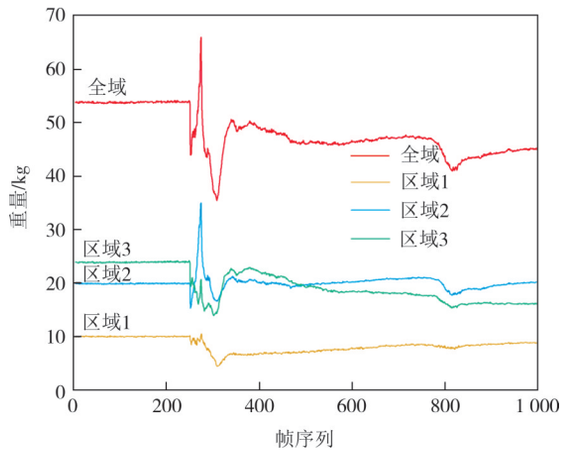
Fig.10 Seat cushion angle 15° backrest angle 25° without leg support pressure data of seat



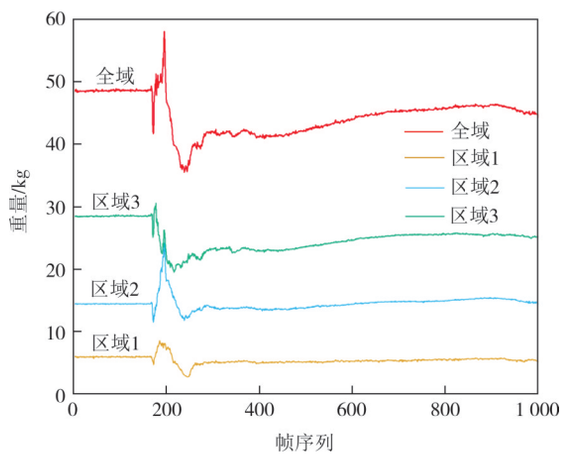
(a)坐垫角 15°靠背角 25°无腿托



(b)坐垫角 25°靠背角 45°无腿托



(c)坐垫角25°靠背角65°无腿托



(d)坐垫角30°靠背角65°有腿托

图11　坐垫区域重量变化趋势图

Fig.11　Seat cushion regional pressure change trend chart

4)在剧烈变化阶段,区域2在图11(b)~图11(d)中都出现了明显尖峰,说明在该阶段乘员骨盆滑移至区域2,乘员与坐垫相互作用力在碰撞阶段达到最大值.

5)在终了状态下,坐垫全域压力相较初始状态减小,说明乘员处于一个较初始更为平躺的姿态,传统三点式约束系统在试验结束后并未使乘员完全恢复至初始状态,仍存在剩余骨盆滑移量.

6　结 论

设计了一套用于滑台试验的高速乘员体压采集系统,提出了一种在碰撞过程中乘员体压数据分析方法,并且通过滑台试验对系统软硬件进行验证,结论如下:

1)该系统在硬件层面拥有完备的存储装置和通信接口,工作稳定,能够满足滑台试验的连续、高速数据采集需求.

2)数据分析软件能够获得碰撞过程中乘员的骨盆滑移轨迹、测量最大滑移量、生成压力云图并标记压力集中区域、生成最大窗口压力均值变化趋势图和坐垫区域重量变化趋势图,数据可视化效果良好,特征突出.

3)该系统在滑台试验中表现良好,采集所得的志愿者体压分布数据与高速摄像系统基本吻合,可作为原测量系统的补充,为乘员姿态响应分析以及约束系统保护效果评估提供数据支撑.

参考文献

[1] 丛明,张犇,杜宇,等. 基于YOLO-6D改进的目标姿态估计算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(12):8-13.
CONG M, ZHANG B, DU Y, et al. Improved target pose estimation algorithm based on YOLO-6D[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023,51(12):8-13.(in Chinese)

[2] 梁桥康,吴樾. 基于HRNet的轻量化人体姿态估计网络[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023,50(2):112-121.
LIANG Q K,WU Y. Lightweight human pose estimation network based on HRNet [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2023,50(2):112-121.(in Chinese)

[3] 韩锟,黄泽帆. 基于人体姿态动态特征的跌倒行为识别方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(12):69-76.
HAN K,HUANG Z F. Falling behavior recognition method based on dynamic characteristics of human body posture[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2020,47(12):69-76.(in Chinese)

[4] NING G C, ZHANG X R, ZHANG Q, et al. Real-time and multimodality image-guided intelligent HIFU therapy for uterine fibroid[J]. Theranostics,2020,10(10): 4676-4693.

[5] 夏资厚,刘吉晓,刘均益,等. 基于RFID的人体姿态识别方法研究[J]. 传感器与微系统,2024,43(1):36-39.
XIA Z H, LIU J X, LIU J Y, et al. Study on human posture recognition method based on RFID [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(1): 36-39.(in Chinese)

[6] 宋国印,陈梦倩,郭士杰. 基于人机接触压力图像的被护理人姿态识别[J]. 传感器与微系统,2023,42(12):40-43.
SONG G Y, CHEN M Q, GUO S J. Recognition of care-receiver's posture based on human-robot contact pressure image [J]. Transducer and Microsystem Technologies,2023,42(12):40-43.(in Chinese)

[7] 石萍,李伟,王卫敏,等. 基于压力分布检测的便携式褥疮防治系统[J]. 生物医学工程与临床,2020,24(3):233-238.
SHI P, LI W, WANG W M, et al. Portable bedsore prevention system based on measurement of pressure distribution [J]. Biomedical Engineering and Clinical Medicine, 2020, 24(3):

233-238.(in Chinese)

[8] 裴卉宁,李苑漠,黄晓光,等. 基于压力分布测量系统的座面材质舒适性优化研究[J]. 航天医学与医学工程,2020,33(5):432-439.
PEI H N,LI Y M,HUANG X G,et al. Research on seat material comfort optimization based on body pressure distribution measurement system[J]. Space Medicine & Medical Engineering,2020,33(5):432-439.(in Chinese)

[9] RAN X,WANG C,XIAO Y,et al. A portable sitting posture monitoring system based on a pressure sensor array and machine learning[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2021,331:112900.

[10] 陈浩川,贾康昱,胡新荣. 基于织物传感器和mVGG-FCN深度学习算法的坐姿识别[J]. 武汉纺织大学学报,2022,35(3):3-8.
CHEN H C,JIA K Y,HU X R. Sitting posture recognition based on fabric sensor and mVGG-FCN deep learning algorithm[J]. Journal of Wuhan Textile University,2022,35(3):3-8.(in Chinese)

[11] 孟站领,张庆来,苑玲伟,等. 不同跌倒风险老年人跨越障碍前后足底压力特征[J]. 医用生物力学,2022,37(4):741-747.
MENG Z L,ZHANG Q L,YUAN L W,et al. Plantar pressure characteristics of the elderly with different fall risks before and after obstacle crossing[J]. Journal of Medical Biomechanics,2022,37(4):741-747.(in Chinese)

[12] 杨先军. 柔性力敏传感及其应用技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2012:13-63.
YANG X J. Study of flexible force-sensitive sensor and application technology[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2012:13-63.(in Chinese)

[13] 陈飞. 考虑驾驶员体压分布的座椅乘坐舒适性研究[D]. 长春:吉林大学,2016:10-58.
CHEN F. Research on riding comfort of seat based on driver body pressure[D]. Changchun:Jilin University,2016:10-58.(in Chinese)

[14] 郭立泉,王计平,熊大曦. 平衡评估压力传感阵列的高速数据采集系统设计[J]. 传感器与微系统,2017,36(11):75-77.
GUO L Q,WANG J P,XIONG D X. Design of high-speed data acquisition system for pressure sensor array in balance assessment[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2017,36(11):75-77.(in Chinese)

[15] 杨镇海. 基于压力坐垫的驾驶行为检测系统的开发和研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018:10-64.
YANG Z H. Development and research of driving behavior detection system based on pressure cushion[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2018:10-64.(in Chinese)

[16] 岳尚军. 基于LabVIEW的压力分布测量及分析系统的研究[D]. 南京:东南大学,2018:9-27.
YUE S J. Research on pressure distribution measurement and analysis system based on LabVIEW[D]. Nanjing:Southeast University,2018:9-27.(in Chinese)

[17] 刘键,鲁艺,许泽君,等. 智能座舱睡眠舒适度的实证研究[J]. 包装工程,2020,41(22):66-71.
LIU J,LU Y,XU Z J,et al. Empirical study on sleep comfort of intelligent cockpit[J]. Packaging Engineering,2020,41(22):66-71.(in Chinese)

[18] ZHAO M,BEURIER B,WANG H,et al. Driver posture prediction using pressure measurement and deep learning[C]// 2020 IRCOBI Asia Proceedings. Beijing:International Research Council on Biomechanics of Injury,2021:102-105.

[19] RIENER A,FERSCHA A. Supporting implicit human-to-vehicle interaction:driver identification from sitting postures[C]// Proceedings of the First Annual International Symposium on Vehicular Computing Systems,July 22-24,2008. Dublin,Ireland:ICST,2008:1-10.

[20] PARK S J,MIN S N,SUBRAMANIYAM M,et al. Driving posture measurement using 3D scanning measuring technique[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems,2015,8(2):600-605.

[21] FENETY P A,PUTNAM C,WALKER J M. In-chair movement:validity,reliability and implications for measuring sitting discomfort[J]. Applied Ergonomics,2000,31(4):383-393.