

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.09.009

自动驾驶车辆乘坐舒适性评价研究综述*

张国娟¹, 胡宏宇¹, 李浩淼¹, 王明剑², 高菲¹, 高镇海¹

(1. 吉林大学, 汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130022; 2. 中国第一汽车股份有限公司, 长春 130013)

[摘要] 随着自动驾驶技术的快速发展, 乘坐舒适性已成为影响自动驾驶车辆用户接受度和体验感的关键因素。本文针对自动驾驶车辆乘坐舒适性评价的研究现状进行系统性综述。首先, 阐述了舒适性的含义, 并分析了影响乘坐舒适性的主要因素。其次, 对自动驾驶车辆的量化指标和评价模型进行了分类与详细阐述。其中, 量化指标分为主观量化指标、基于车辆参数的量化指标、基于生理信号的量化指标以及基于驾驶员行为的量化指标; 评价模型包括心理物理学模型、生物力学模型、统计学模型以及基于学习的评价模型。最后, 提出了自动驾驶车辆舒适性研究的未来发展趋势, 为进一步研究自动驾驶车系统设计与用户体验提升提供了技术参考。

关键词: 自动驾驶汽车; 乘坐舒适性; 量化指标; 评价模型; 综述

A Survey on Ride Comfort Evaluation of Autonomous Vehicles

Zhang Guojuan¹, Hu Hongyu¹, Li Haomiao¹, Wang Mingjian², Gao Fei¹ & Gao Zhenhai¹

1. Jilin University, National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Changchun 130022;

2. China FAW Corporation Limited, Changchun 130013

[Abstract] With the rapid development of automated driving technology, ride comfort has become a key factor affecting user acceptance and overall experience with automated vehicles. In this paper, a comprehensive review of the current state of research concerning the evaluation of riding comfort in automated vehicles is presented. Firstly, the concept of comfort is thoroughly articulated, followed by an analysis of key factors influencing ride comfort. Subsequently, the quantitative indicators and evaluation models pertinent to automated vehicles are classified and elaborated in detail. The quantitative indicators are classified into four categories: subjective indicators, indicators derived from vehicle parameters, indicators based on physiological signals, and indicators related to driver behaviour. The evaluation models encompass psychophysical models, biomechanical models, statistical models, and learning-based evaluation models. Finally, prospective trends in the research of comfort in automated vehicles is brought forward, thereby offering a technical framework for further studies on the system design and user experience in this domain.

Keywords: automated vehicles; ride comfort; quantitative indicators; evaluation model; review

前言

近年来自动驾驶技术不断发展, L1、L2级辅助驾驶系统已实现大规模量产应用, L3、L4高等级自动驾驶逐步开展测试运营, 为用户提供安全、高效、

便捷的智能出行服务。随着汽车自动化程度不断提高, 驾驶员角色逐渐转变为乘员, 乘坐舒适性对于消费者对自动驾驶车辆接受程度起到至关重要的作用^[1]。如何对乘坐舒适性进行科学的量化与评价, 进而提升乘车体验, 已成为众多车企与科研院所的关注重点。

* 国家自然科学基金(52272417)和吉林省重大科技专项(20220301009GX)资助。

原稿收到日期为2024年05月30日, 修改稿收到日期为2024年08月05日。

通信作者: 高菲, 副教授, 工学博士, E-mail: gaofei123284123@jlu.edu.cn。

相较于传统车辆,自动驾驶车辆的不适感主要源于自动驾驶的智能决策控制效果以及人机协同交互性能,由于操纵车辆造成的工作负荷与身体不适感逐渐减少,乘客的乘坐体验受到更加广泛的关注。以往的自动驾驶系统,研究者主要聚焦于算法模块开发,侧重于自动驾驶车辆的安全和效率,系统往往“重安全,轻舒适”,车辆乘坐舒适性经常被忽略。而车辆乘坐舒适性会影响人们对自动驾驶车辆的接受度和信任度^[2-3],进而影响自动驾驶车辆的普及。

目前,已有大量研究针对车辆的乘坐舒适性提出了不同的量化方法,部分学者从车辆动力学参数出发,通过车辆运动状态对舒适性进行评估^[4-5];一部分从乘员本身出发,在心理及生理层面对乘员乘坐感受及舒适性进行量化^[6-8],其方法包括主观调查问卷、生理信号采集等。基于此,本文从舒适性的定义与影响因素、自动驾驶车辆乘坐舒适性的量化指标、乘坐舒适性的评价模型、未来发展趋势等方面对自动驾驶车辆乘坐舒适性进行了综述,期望对自动驾驶车辆乘坐舒适性领域提供一定的支撑与参考。

1 乘坐舒适性定义与影响因素

1.1 乘坐舒适性定义

舒适性是一个十分复杂的概念,存在诸多影响因素,在航空航天、汽车、铁路等人机交互领域,已经较早地提出了舒适性的定义。Slater^[9]将舒适性定义为“人与环境之间在生理、心理和身体层面和谐愉悦的状态”,Richards等^[10]认为舒适是涉及个人主观幸福感的一种状态,是对环境或情境的反应。虽然对于舒适性没有一个明确的定义,但是Looze等^[11]给出了舒适性的3个主要特征:(1)是一种主观且基于个人的概念;(2)受到各种因素(身体,生理和心理)的影响;(3)来自人与环境的相互作用。

随着自动驾驶汽车的舒适性得到越来越广泛的关注,一些研究人员尝试给出这种特定类型车辆的乘坐舒适性定义。Carsten和Martens^[12]将舒适性描述为“在没有生理与心理压力下乘坐车辆时的主观愉悦感”,Hartwich等^[13]认为舒适性是由安全可靠的车辆操纵带来的一种主观上的放松状态。基于上述,本文将自动驾驶车辆的乘坐舒适性归纳定义为由自动驾驶车辆自主运行带来的乘员生理及心理上放松、愉悦的状态,这种状态可通过主观、客观评价手段进行量化表征。反之则是乘坐不舒适性,在超

出一定舒适阈值后,会导致更为严重的晕动^[14]、病变情况。

1.2 舒适性的影响因素

在L1、L2自动驾驶系统中,影响舒适性的主要因素为辅助驾驶系统功能的参数设计。以ACC功能为例,车辆行驶过程中的最小车距、车速、加速度等参数设定均具有一定的设计标准^[15],以保证乘坐过程中的安全性与舒适性。相关研究表明,加速度与加速度变化率是影响车辆乘坐舒适性的关键设计参数。

在L3级有条件自动驾驶下,绝大部分情况下的车辆控制由自动驾驶系统完成,但当车辆的运行条件超出设计运行域(ODD)时,需要驾驶员对车辆进行及时接管。因此车辆的运动特性与自动驾驶、人工驾驶模式间的平稳切换,是影响L3级自动驾驶车辆乘坐舒适性的关键因素。接管时间预算、接管请求方式与交互界面的设计^[16]均会对切换过程的安全性及舒适性产生影响。目前常见的接管信号形式有声音报警、仪表盘图像警告、转向盘振动反馈等。此外,驾驶员在接管前所从事的非驾驶任务类型也会对接管过程中车辆的稳定性产生影响^[17]。对于L3级自动驾驶,舒适性研究往往从人机交互的角度进行讨论,本文所关注的舒适性更多从乘坐体验考虑。

L4高度自动驾驶条件下,车辆的控制由人类驾驶员转移到自动化系统^[18],用户将从驾驶员的角色转变为乘员,驾驶任务由自动驾驶系统完成。L4级自动驾驶车辆乘坐舒适性主要取决于系统的决策规划、运动控制等模块的功能定义,逻辑设置以及参数设计。例如车辆以何种方式通过十字路口、如何与他车进行运动交互等^[19]。部分研究对高等级自动驾驶车辆的运动特性与乘坐舒适性间的关系进行了探索,例如Dettmann等^[20]发现加速度及制动强度是对舒适感影响最大的运动参数,Peng等^[19]对比了机器驾驶特性与类人化驾驶特性对乘员乘坐舒适的影响,结果表明类人的驾驶特性具有更高的舒适性,并且类人驾驶中“保守型”的驾驶特性舒适性更高。此外,相关研究表明,自动驾驶系统的运行特性同样会影响乘员对于自动驾驶车辆的安全预期与信任程度,而安全预期与信任程度会直接影响乘员的乘坐舒适性^[21]。并且当乘客对车辆的自动驾驶系统产生不信任情绪时,会尽可能避免开启自动驾驶系统或乘坐自动驾驶车辆,导致自动驾驶技术难以被接受并普及。

2 自动驾驶车辆乘坐舒适性量化指标

自动驾驶车辆舒适性的量化指标可以分为主观量化指标与客观量化指标。其中,客观量化指标又可以进一步划分为基于车辆参数的量化指标、基于生理信号的量化指标及基于驾驶员行为的量化指标。下面将分别对自动驾驶乘坐舒适性的主客观量化指标进行综述。

2.1 主观量化指标

目前车辆乘坐舒适性主观量化大多基于评价量表、问卷或访谈,对乘员的主观乘坐感受进行评估,该方法能够灵活、简单地直接获取乘员对于自动驾驶车辆的乘坐体验,是各大车厂检验车辆乘坐舒适性的一个重要手段。

主观评价量表,即对心理及生理感受进行赋值,SAE J1060^[22]给出了汽车轮胎噪声及舒适性的主观评价方法(表1),该方法将测试者类别纳入评价,分为“所有测试者”“多数测试者”“某些测试者”“关键测试者”及“经验测试者”,评分范围为间隔均等的1-10分,10分为舒适性极佳,1分为难以接受,又根据分数将舒适性划分为了3个等级:1-4分为“不可接受”,5分为“临界值”,6-10分为“可接受”。该量表的使用方法分为3步:首先,根据表格确定大致等级,即“不可接受”“临界值”还是“可接受”,其次评估各类测试者的舒适性,将评估范围缩小,最终根据前两步的结果给出综合评分。

表1 SAE主观评价量表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
不可接受				边界线	可接受				
有条件地记为									
所有测试者		多数测试者		某些测试者	关键测试者		经验测试者		未观察
无法接受	严重不适	非常差	差	临界	勉强接受	较好	好	非常好	极好
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

部分舒适性评价量表将舒适性划分为等间隔的多个等级,并给予各个等级相应的分数。例如五级Likert量表^[23],将舒适性划分为5个等级,其中1分为最不舒适,5分为最舒适;兰凤崇等^[24]对SAE主观评价量表进行变化,省略测试者的影响,将主观舒适性划分为10个等级,分别赋予均等的1-10分;Borg CR-10量表^[25]同样是将舒适性划分为了10个等级。

除主观评价量表外,许多研究通过问卷调查的方式对乘员的乘坐舒适性进行评估,使用该方法可根据实验需求自由设计问卷内容,具有较强的灵活性与可变性。也有相关研究通过半结构化访谈^[26]的方式对乘客的乘坐感受进行询问,该方法具有更强的针对性,并且相比于主观调查量表与问卷,可以获得更多有效内容。上述主观量化指标均基于传统驾驶车辆,目前对于自动驾驶车辆的主观舒适性评价仍旧依托于传统的评价方法,这些方法在自动驾驶车辆中依旧具有较强的适用性。虽然主观评价法简单便捷,但其缺点是具有较强的主观性,十分容易受到个体差异的影响。

2.2 基于车辆参数的量化指标

在车辆运动参数中,加速度与加速度变化率被认为是影响乘坐舒适性的关键参数。ISO 2631“人体全身振动评价指南”^[27]将车辆的振动信号作为舒适性的评价指标(图1),分别对座椅支撑面、座椅靠背、脚支撑面3处的振动加速度输入进行轴加权及频率加权,根据表2中总加权加速度均方根值 a_w 、加权振级 L_{aw} 与人的主观感受之间的对应关系给出舒适性评级。

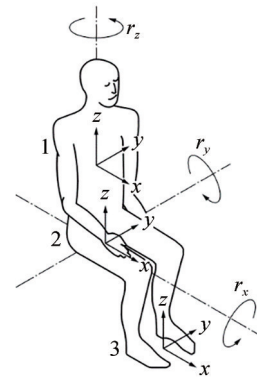


图1 ISO 2631人体坐姿受振模型

表2 a_w 、 L_{aw} 和人的主观感觉之间的对应关系

加速度均方根值 $a_w/(m \cdot s^{-2})$	加权振级 L_{aw}/dB	人的主观感觉
<0.315	<110	没有不舒适
0.315~0.63	110~116	有一些不舒适
0.5~1.0	114~120	相当不舒适
0.8~1.6	118~124	不舒适
1.25~2.5	112~128	很不舒适
>2.0	>126	极不舒适

GB/T 4970—2009《汽车平顺性试验方法》^[28]选取乘员座椅支撑面、座椅靠背、脚支撑面处的垂向最大(绝对值)加速度响应 \ddot{Z}_{max} 作为评价指标:

$$\ddot{z}_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ddot{z}_{\max j}$$

式中 n 为脉冲试验的有效次数 ($n \geq 5$)。

当振动峰值系数大于 9 时,使用辅助评价方法进行评价,选取振动剂量值 VDV 作为评价指标:

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}$$

式中: $a_w(t)$ 为加权加速度时间历程, m/s^2 ; T 为振动作用时间, s 。

Bae 等^[29]通过回顾现有关于乘坐舒适性标准的相关研究,设计了乘员偏好度量(OPM),该度量定义了不同舒适性感受车辆下横、纵向加速度及加速度变化率的变化区间。Tan 等^[30]的研究表明,当车辆的横向加速度和纵向加速度变化率分别控制在 0.15 和 0.25 g/s 以下时,具有较好的乘坐舒适性。Du 和 Tan^[31]通过限制转向盘角度及车辆加速度来减小车辆运动对乘客造成的冲击。表 3 对基于车辆加速度与加速度变化率的舒适性评价进行了梳理。

当车辆加速度超过一定阈值,随着时间的累积,容易导致更严重的晕动现象,在 ISO 2631-1:1997 标准中,引入了加速度频率加权的方法,以评估车辆振动对晕动症发病的影响。评价指标为晕动症剂量值 $MSDV$:

$$MSDV = \sqrt{\int_0^T [a_w(t)]^2 dt}$$

式中: a_w 为频率加权后的加速度; T 为机体暴露于加速度刺激下的总时间。

基于车辆参数的量化指标具有较强的客观性及可解释性,但不同乘员对于车辆运动冲击的接受程度不同,并且以车辆加速度为例,相同的加速度信号经过不同的轮胎、悬架、座椅等部件传递到人体的冲击是不同的,因此这种指标同样具有一定的局限性。

2.3 基于生理信号的量化指标

基于生理信号的量化方法通过测量车辆行驶过程中乘员的各项生理信号,结合解剖学、医学、心理学等领域对于人体生理机制的基础理论,得出不同生理指标变化与人的舒适性之间的关系。在生理指标的测量方面,目前测量手段已经较为全面并且形成了相应的研究与操作规范,包括眼部活动测量、心电测量、皮电测量、肌电测量、脑电测量、近红外脑功能成像、体压测量等多种生理指标测量,并且利用医

学、传感技术、统计分析、信号处理等多个学科专业知识与方法对生理因素进行处理与分析^[34],为驾驶员与乘员的感受研究提供了极大的帮助。

在心率、眼动及皮肤电活动测量方面,Stapel 等^[35]研究了 L2 级自动驾驶条件下驾驶员的信任与风险感知情况,探究了风险感知与驾驶员心率、皮肤电活动(GSR)、眼动信号的关系,结果表明 GSR、心率和瞳孔大小对风险感知有关,但对个体事件的监测缺乏特异性。Yang 等^[36]探究了不同运动状态对心率变异(HRV)参数的影响,结果表明在制动过程中心率 N-N 间期标准(SDNN)显著降低,并且制动强度越大,舒适性越低。Beggiato 等^[37]基于模拟驾驶器的研究表明,在自动驾驶条件下,不适感会导致驾驶员心率与瞳孔直径发生显著变化,随着不舒适的时间增加,心率逐渐降低并且瞳孔直径逐渐减小。

在肌电测量方面,Zheng 等^[38]研究利用表面肌电(EMG)测量、估计和量化了乘客在障碍赛中胸锁乳突肌(SCM)对汽车横向加速的反应,结果表明左右侧 SCM 的肌电信号与汽车横向加速方向呈负相关,肌电信号增大时,乘客的不适感增强。Zheng 等^[39]还探究了不同驾驶模式(手动驾驶及自动驾驶)及跟车距离下驾驶员咬肌及手掌汗液的变化,结果表明咬肌肌电和手掌汗液与驾驶员的主观精神负荷有着相同的变化趋势。Kia 等^[40]探究了不同的座椅悬挂方式(静态、半主动、主动)对竖脊肌、斜方肌、头夹肌和胸锁乳突肌 4 处肌肉肌电信号的影响,结果表明相较于静态座椅悬挂,半主动与主动悬挂方式下测得的左侧斜方肌与头夹肌活动信号较低,舒适性较高。

在脑电及近红外脑功能成像(f-NIRS)测量方面,Jaume 等^[7]采用近红外脑功能成像技术来客观测量自动驾驶过程中乘员对于自动化系统的信任程度,结果表明眶额皮层、腹外侧和背外侧前额叶皮层结构是最有可能负责高度自动驾驶中自动化信任的部分。Chuang 等^[41]发现大脑额叶和颞叶 δ 及 β 波功率、枕区 δ 和 θ 波功率,与晕动症密切相关。

在体压测量方面,静态体压已被广泛用于座椅静态舒适性评价^[42-44],而对于车辆行驶过程中的动态体压变化研究较少,重庆大学的张志飞等^[45]发现平均压力变化率和法向力变化率的均方根值与主观不舒适性评分均具有较高的关联性 ($R > 99.0\%$),能够较好地衡量车辆的动态振动舒适性。

表 4 详细列出了上述基于生理信号的量化指标。生理指标测量具有客观、有效、精确的优点,由

表3 车辆加速度、加速度变化率舒适阈范围

文献	车辆参数	年份	舒适性量化指标	舒适性/不舒适性阈范围
[15]	车速 加速度 加速度变化率	2009	车速 5-20 m/s 下的车辆纵向加速度/(m·s ⁻²)	<-3.5(20 m/s)~-5(5 m/s)
			车速 5-20 m/s 下的车辆纵向减速度/(m·s ⁻²)	<2(20 m/s)~4(5 m/s)
			车速 5-20 m/s 下的车辆纵向加速度变化率/(m·s ⁻³)	<2.5(20 m/s)~5(5 m/s)
[28]	加速度 加速度变化率	2020	横向加速度/(m·s ⁻²)	a <0.9(公共交通)
				0.9< a <4(正常型)
				4< a <5.6(激进型)
				5.6< a <7.6(极度激进型)
			纵向加速度/(m·s ⁻²)	a <0.9(公共交通)
				-2.0<a<-0.9;0.9<a<1.47(正常型)
				-5.08<a<-2.0;1.47<a<3.07(激进型)
				3.07<a<7.6(极度激进型)
			横向加速度变化率/(m·s ⁻³)	-7.6<a<-5.08(紧急制动)
				z <0.6(公共交通)
				0.6< z <0.9(正常型)
				0.9< z <2.0(激进型)
纵向加速度变化率/(m·s ⁻³)	z <0.6(公共交通)			
	0.6< z <0.9(正常型)			
	0.9< z <2.0(激进型)			
[32]	加速度	2016	纵向加速度	0~0.14g(轻轨交通)
				0.14g~0.25g(保守型)
				0.25g~0.50g(自信型)
			纵向减速度	0~-0.14g(轻轨交通)
				-0.14g~-0.33g(保守型)
				-0.33g~-0.76g(自信型)
			横向加速度	0~0.15g(轻轨交通)
				0.15g~0.42g(保守型)
				0.42g~0.54g(自信型)
			垂向加速度	0~0.16g(保守型)
				0.16g~0.66g(自信型)
[29]	加速度 加速度变化率	2022	横向加速度	<0.15g
			横向加速度变化率	<0.25g/s
[33]	加速度	2015	横向加速度/(m·s ⁻²)	<1.8(可接受)
				1.8~3.6(能够忍受)
				>5(超出承受范围)
[26]	加速度	1997	加速度均方根值/(m·s ⁻²)	<0.315(没有不舒适)
				0.315~0.63(有一些不舒适)
				0.5~1.0(相当不舒适)
				0.8~1.6(不舒适)
				1.25~2.5(很不舒适)
				>2.0(极不舒适)

于测量结果以客观数据形式呈现,可以通过后续的标准、归一化等统计分析方法对数据进行梳理,避免了由于个体差异而造成的试验误差,并且随着传感器设备、通信技术以及计算机技术的发展,出现了无须佩戴的屏幕式眼动仪^[46],通过摄像头实时监测被试人员眼部活动,为实现驾乘人员状态的实时监

测提供了技术支持,同时避免了设备穿戴对试验造成的干扰。但是目前大多数生理测量设备,例如多功能生理测量仪、脑电测量设备等,仍然需要被试人员进行穿戴后测量,对研究具有一定的干扰性,并且需要数据采集后进行处理与统计分析,难以实现实时监测。

表4 基于生理信号的量化指标

文献	生理信号	年份	应用场景
[35]	心率、皮肤电、眼动	2022	乘员对L2级自动驾驶的信任与风险感知
[36]	心率变异性	2021	L2级自适应巡航系统的乘坐舒适性
[37]	心率、皮肤电、眼动	2019	高度自动驾驶车辆的乘坐舒适性
[39]	肌电、汗液	2015	自动驾驶货车的乘坐舒适性
[40]	肌电	2021	自动驾驶车辆不同悬挂类型的乘坐舒适性
[9]	近红外脑功能成像	2023	乘员对自动驾驶车辆的信任程度
[41]	脑电	2016	乘员乘坐车辆的晕动状态评估
[38]	肌电	2013	标准障碍测试工况下的乘坐舒适性
[42]	静态体压	2000	车辆座椅的静态乘坐舒适性
[43]	静态体压	2012	
[44]	静态体压	2023	
[45]	动态体压	2022	车辆座椅的动态乘坐舒适性

2.4 基于乘员行为的量化指标

乘员在乘坐自动驾驶车辆时的行为能够直接反映其舒适状态,常见的乘员行为量化指标包括身体姿态、面部表情和非驾驶任务表现,下面将从这3个方面对基于乘员行为的自动驾驶汽车乘坐舒适性量化进行探讨。

对于身体姿态的研究主要集中于乘员的关节角度和关节扭矩^[47],Zacher等^[48]通过试验验证了关节角度对于乘坐舒适性的影响,部分学者通过试验研究逐步确定了驾驶员的舒适姿势与最优关节角度^[49-50]。目前对于身体姿态舒适性的研究大多围绕驾驶员的驾驶舒适性,而对于非驾驶位的乘员乘坐舒适姿态研究较少,暂未形成规范的评价标准。

面部表情是人类情感与心理状态的直接反映,乘员乘车过程中的面部表情可以提供关于其情绪状态的重要信息,目前对于人体面部表情的研究大多围绕驾驶员疲劳监测方面,例如单位时间内眼睛闭合的时长与单位时间的比例(PERCLOS)^[51]是目前被广泛认可的驾驶员疲劳监测指标,此外还有驾驶员哈欠时的嘴部开闭程度、点头频率等。虽然在乘员舒适性评估方面基于面部表情的研究较少,但随着车辆监测系统的发展与自动化等级的提高,对乘员情绪进行实时监测,进而调整自动驾驶策略,有望在未来实现。

在L3-L4级自动驾驶条件下,乘员能够进行非驾驶任务,部分研究通过乘员进行非驾驶任务时的

表现对车辆的乘坐舒适性进行量化与评估。例如Kia等^[40]通过令被试在18个圆圈中指定目标圆任务与打字任务,评估乘员在乘坐不同类型的座椅悬挂下(被动、半主动、主动)的乘坐舒适性,但是这种方法受个体差异影响较大并且只适用于特定的驾驶场景。

3 自动驾驶车辆乘坐舒适性评价模型

3.1 心理物理学模型

对于舒适性的评估本质上是较为主观的感受评估,因此许多研究人员试图通过建立心理物理学模型来客观量化舒适性^[52],心理物理学模型主要研究物理刺激与心理量之间的定量关系^[53],Gorelik等^[54]通过监测驾驶员的心理物理学状态探究了心理量与车辆运动参数之间的关系。美国心理物理学家史蒂文斯1953年提出了“史蒂文斯幂定律”^[55],客观量化了人的主观感受与外部输入的刺激量之间的关系,发现心理量与刺激量的乘方成正比。目前已有大量研究应用史蒂文斯幂定律探究乘客的主观感受与客观评估之间的关系^[56-57]。唐传茵等^[58]利用模糊随机评价模型分析了心理物理学中的不确定性,提出了一种基于烦恼率的舒适度评价方法。这种基于心理物理学模型的评价方法基于心理学理论,具有较强的稳定性与可解释性,但其应用场景较为单一,难以应用于复杂多变的工况,具有一定的局限性。

3.2 生物力学模型

基于人体生物力学模型的评价模型已经被广泛应用于车辆振动舒适性与乘坐舒适性领域,在人体动力学、生物力学、解剖学等学科理论与实验的基础上,学者们开发了一系列的人体动力学模型,例如有限元模型、多体动力学模型、骨肌系统动力学模型等。

人体有限元模型基于有限元方法,考虑了人体软组织、骨骼组织等特征,可用于计算评估人体内部应力、应变等,进一步根据人体受力状况对舒适性进行评估^[59-60]。Amiri等^[61]通过建立人-椅系统有限元模型,对全身振动和坐姿对车辆乘员腰椎负荷的影响进行了仿真分析,为汽车乘坐舒适性设计提供了重要理论依据。Guo等^[62]建立了人体皮肤、骨骼和肌肉的实体模型与人体-座椅系统的集成模型,通过有限元模型分析了座椅腰部支撑参数对重力作用下身体与座椅相互作用的影响。基于有限元模型的评

估方法需求的数据量及计算量较大并且准确程度依赖于人体生物力学参数(软组织、关节参数等)^[63],因此具有一定的局限性。

多体动力学模型将人体分区并简化为多刚体,通过铰链进行连接,可以粗略地对人体的局部生物力学响应进行计算评估^[64-65]。Liang和Chiang^[66]建立了具有靠背支撑的5自由度多体动力学模型,可预测不同驾驶姿势下人体头部、背部和臀部的传递率。多体动力学模型可以较为简单便捷地求解人体对外界刺激的响应,例如人体不同部位的加速度参数等,但缺少人体组织的特征描述,具有较低的精度。

骨肌系统动力学模型在多体动力学模型的基础上,将骨骼看作刚体,肌肉、软组织等对骨骼施加的力看作力线,关节简化为阻尼器与弹簧,与生物力学相结合对人体的舒适性进行仿真分析^[67]。骨肌系统动力学模型相较于多体动力学模型更加精确,其关键问题有:如何利用数学模型表征肌肉力、如何对片状复杂肌肉进行建模等。进一步,如何与人脑感知与肌肉代谢疲劳建立联系,对乘坐舒适性进行评估,是其下一步的发展趋势。

基于生物力学的模型,从人体生物学特性出发,结合多领域理论对于人体进行建模与舒适性评价,具有较强的可解释性与理论支撑,但数据量与计算量较大,不适用于复杂工况及实时评估。

3.3 统计学模型

车辆舒适性评价是一个复杂的过程,涉及多个变量和指标,基于统计学模型的方法大多应用于实验研究,能够从大量的实验数据中找出统计学规律,进而构建相应的统计学模型,也是自动驾驶车辆舒适性研究中最常用的方法。常用的构建统计学模型的方法包括回归分析、方差分析、主成分分析等。基于统计学的模型能够准确、客观地对乘员舒适性进行量化,并且可以通过统计检验判断结果的显著性,但其对于数据的依赖性较强,并且传统统计模型通常基于静态数据,可能无法及时反映动态变化,如乘客偏好或环境因素的变化。

3.4 基于学习的评价模型

随着人工智能技术的进步,对于车辆乘坐舒适性的评估逐渐转向基于学习的方法,例如深度学习^[68]、半监督学习^[69]、集成学习^[70]等。Huang等^[71]将客观评价指标与乘员的主观感受评分输入BP(Back Propagation)神经网络模型进行训练和验证,实现了根据客观车辆运动信号对汽车行驶舒适性进行评估

(图2)。BP神经网络是一个高度非线性的输入输出系统,结构简单并且具有较好的学习、容错能力,能够满足主客观评价的拟合需求。

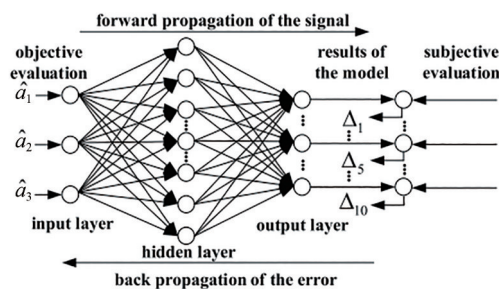


图2 基于BP神经网络的舒适性评价模型^[71]

Teron等^[72]建立了一个3层人工神经网络模型,量化了车辆客观参数(速度、加速度、加速度变化率)、乘客相关特征(位置、年龄、身高、体质量等)、乘坐舒适性指标(振动剂量值和最大瞬态振动值)与乘客主观舒适性评分之间的关系。Taghavifar等^[73]使用4层神经网络模型,建立了乘客感受与车辆振动参数之间的非线性关系。

Mou等^[74]建立了基于注意力机制的CNN-LSTM模型,用于评估驾驶员压力,该模型通过融合人眼数据、车辆动力学数据和环境数据来提取压力相关信息,从而对驾驶员的压力水平进行分类。

基于学习的评价方法能够开发出具有强大功能的机器学习模型,这些模型可以用于量化自动驾驶车辆的舒适性^[75]。然而,基于学习的模型通常为一个黑盒子,具有较低的可解释性。此外,这些模型的准确性在很大程度上依赖于数据集的质量和准确性,乘客舒适性量化领域的数据集有限,一定程度上阻碍了基于学习的评价模型在自动驾驶车辆乘坐舒适性量化方面的进一步发展。

4 自动驾驶车辆舒适性发展趋势

4.1 多维度综合评价

上述的每种评价方法都具有其局限性,同时,车辆舒适性评估本身就是一个多维度问题,覆盖了生理、心理等多角度的舒适性,因此车辆舒适性评估的一个未来发展趋势是多维度、多方法综合评估,兼顾乘客的生理与心理舒适性、评价模型的准确性、可靠性与可解释性。目前大多自动驾驶车辆舒适性评估均采用主、客观综合评估的方法,同时考虑乘员的心理

理及生理舒适性^[76-77]。部分学者通过改进评价模型的方法提高舒适性表达的全面性,Zhu等^[78]综合考虑了模型的功能与可解释性、可表达性,提出了一种基于心理物理机制与编码器-转换器叠加的舒适性量化方法,并在实车上验证了模型的可靠性与实时性(图3)。

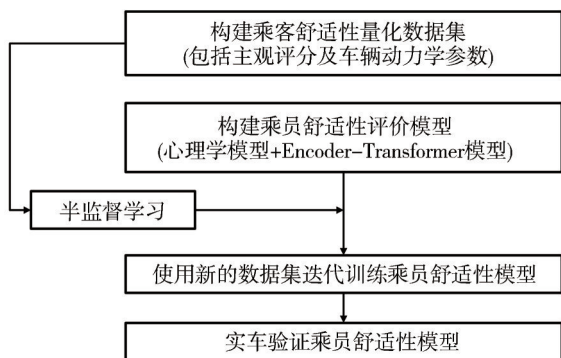


图3 基于心理物理机制与编码器-转换器叠加的舒适性量化方法^[78]

4.2 个性化舒适性评价

不同个体对于舒适性的感受具有一定的差异,因此未来的舒适性评价将更加倾向于个性化,将不同乘员的舒适性偏好纳入考虑范围。Bellem等^[79]为了改进驾驶策略,通过改变加速度和加速度变化率,对车辆在换道、加速以及减速工况下的乘坐舒适性进行了深入的分析,同时还探究了乘客的人格特质和驾驶喜好对自动驾驶操纵策略偏好的影响。此外,一些研究提出通过用户界面,让乘客自己选择舒适性的评价标准和权重^[80],这种方法将乘客的个性化需求直接纳入到舒适性的评价中,使得舒适性的提升更加贴合乘员的实际需求。

上述研究表明,未来的舒适性评价将更加注重乘员的个性化的需求,将乘员的舒适性偏好纳入评价体系,可以有效提升乘员的乘坐体验,为自动车辆的乘坐舒适性的提升提供新的方向。

4.3 实时、主动调节

传统的舒适性评价流程主要依赖于试验-采集-评估的方式,这种方式在很大程度上缺乏实时监测和评估的能力。然而,随着传感器技术和数据处理技术的快速发展,未来的评价方法将更加倾向于实时评估的模式。在这种模式下,各种传感装置将被安装在车辆上,用以实时监测车辆的运动状态以及乘客的生理反应。实时量化不仅可以提供即时的反馈,帮助驾驶员或自动驾驶系统及时调整驾驶策

略,优化乘坐体验,而且还可以用于长期的数据收集和分析,以便更准确地设计和调整车辆的控制策略,最大程度地提升驾乘人员的舒适性。实时的舒适性量化、反馈将是未来舒适性评价方法的一个发展趋势。

在实时舒适性监测和评估系统的基础之上,进一步实现对车辆舒适性的主动调控。目前,已经有大量的研究工作聚焦于设计和实现车辆的自适应控制策略,以实现舒适性的主动调控,例如主动悬架系统^[81]、主动转向系统^[82]、制动系统等关键技术领域。然而,这些控制策略在设计时大多数基于车辆的运动参数,并未充分考虑驾乘人员的差异性,而驾乘人员的差异性,例如身体条件、驾驶习惯等,会对车辆舒适性产生较为显著的影响,但目前在大数目的控制策略中并未得到充分的关注和研究,在多维度、个性化、实时舒适性评估的基础上,实现车辆乘坐舒适性的动态调控,将是未来自动驾驶车辆舒适性的重要发展方向。

5 总结与展望

综上所述,自动驾驶车辆乘坐舒适性是一个多维度、多层次的复杂问题,不仅涉及到乘员的生理反应,如眩晕、焦虑、肌肉疼痛等,也涉及到乘员的心理感受,如安全感、放松感等,这些生理和心理舒适性受到多种因素的影响,对于自动驾驶车辆,车辆的运动参数设计、自动驾驶系统的运行特性以及接管过程的车辆稳定性等均会对乘员的乘坐舒适性产生一定影响。基于此,本文将自动驾驶车辆的舒适性量化指标分为4类,分别为主观量化指标、基于车辆参数的量化指标、基于生理信号的量化指标以及基于驾驶员行为的量化指标,并对每种指标的应用及优缺点进行了详细梳理。之后对乘坐舒适性的评价模型进行了分类总结,分别为心理物理学模型、生物力学模型、统计学模型及基于学习的评价模型。基于上述分析,自动驾驶车辆乘坐舒适性评价仍存在一定的局限性,故对其未来发展趋势提出了展望,即将向着多维度、个性化、实时、主动调节的方向发展。

参考文献

- [1] DICHABENG P, MERAT N, MARKKULA G. Factors that influence the acceptance of future shared automated vehicles—a focus group study with United Kingdom drivers [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 82:

- 121-140.
- [2] DELMAS M, CAMPS V, LEMERCIER C. Effects of environmental, vehicle and human factors on comfort in partially automated driving: a scenario-based study[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2022, 86: 392-401.
- [3] HOLTHAUSEN B E, WINTERSBERGER P, WALKER B N, et al. Situational trust scale for automated driving (STS-AD): development and initial validation [C]. *12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 2020: 40-47.
- [4] MARJANEN Y, MANSFIELD N J. Relative contribution of translational and rotational vibration to discomfort [J]. *Industrial Health*, 2010, 48(5): 519-529.
- [5] LI Z, FU R, WANG C, et al. Effects of linear acceleration on passenger comfort during physical driving on an urban road [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2020, 18: 1-8.
- [6] ZONG C, GUO K, GUAN H. Research on closed-loop comprehensive evaluation method of vehicle handling and stability [C]. *SAE Paper 2000-01-0694*.
- [7] PERELLO-MARCH J R, BURNS C G, et al. Using fNIRS to verify trust in highly automated driving[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(1): 739-751.
- [8] HU H, ZHANG G, CHENG M, et al. Biosignal-based driving experience analysis between automated mode and manual mode [C]. *SAE Paper 2024-01-2504*.
- [9] SLATER K. Discussion paper the assessment of comfort [J]. *Journal of the Textile Institute*, 1986, 77(3): 157-171.
- [10] RICHARDS L G, JACOBSON I R A D, BARBER R W, et al. Comfort reactions to bus motion on curved roadways [J]. *Ergonomics*, 1979, 22(5): 517-519.
- [11] DE LOOZE M P, KUIJT-EVERS L F M, VAN DIEEN J. Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures [J]. *Ergonomics*, 2003, 46(10): 985-997.
- [12] CARSTEN O, MARTENS M H. How can humans understand their automated cars? HMI principles, problems and solutions [J]. *Cognition, Technology & Work*, 2019, 21(1): 3-20.
- [13] HARTWICH F, BEGGIATO M, KREMS J F. Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving-effects of drivers' age and driving style familiarity [J]. *Ergonomics*, 2018, 61(8): 1017-1032.
- [14] PENG C, HORN S, MADIGAN R, et al. Conceptualising user comfort in automated driving: findings from an expert group workshop [J]. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2024.
- [15] Intelligent transport systems-full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems-performance requirements and test procedures: JIS D0807-2011 [S]. 2011.01.01.
- [16] GOLD C, HAPPEE R, BENGLER K. Modeling take-over performance in level 3 conditionally automated vehicles [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 116: 3-13.
- [17] LIANG N, YANG J, YU D, et al. Using eye-tracking to investigate the effects of pre-takeover visual engagement on situation awareness during automated driving [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 157: 106143.
- [18] ELBANHAWI M, SIMIC M, JAZAR R. In the passenger seat: investigating ride comfort measures in autonomous cars [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2015, 7(3): 4-17.
- [19] PENG C, MERAT N, ROMANO R, et al. Drivers' evaluation of different automated driving styles: is it both comfortable and natural? [J]. *Human Factors*, 2022: 00187208221113448.
- [20] DETTMANN A, HARTWICH F, ROBNER P, et al. Comfort or not? automated driving style and user characteristics causing human discomfort in automated driving [J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2021, 37(4): 331-339.
- [21] PADDEU D, PARKHURST G, SHERGOLD I. Passenger comfort and trust on first-time use of a shared autonomous shuttle vehicle [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102604.
- [22] Subjective rating scale for evaluation of noise and ride comfort characteristics related to motor vehicle tires: SAE J1060 [S]. USA: SAE, 2014.
- [23] 亓莱滨. 李克特量表的统计学分析与模糊综合评判 [J]. *山东科学*, 2006, 19(2): 18-23, 28.
- QI L B. Statistical analysis and fuzzy comprehensive evaluation of Likert scale [J]. *Shandong Science*, 2006, 19(2): 18-23, 28.
- [24] 兰凤崇, 李诗成, 陈吉清, 等. 自动驾驶汽车乘员个性化乘坐舒适性辨识方法 [J]. *汽车工程*, 2021, 43(8): 1168-1176.
- LAN F C, LI S C, CHEN J Q, et al. Identification method for occupant personalized ride comfort of autonomous vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(8): 1168-1176.
- [25] FRASIE A, BERTRAND-CHARETTE M, COMPAGNAT M, et al. Validation of the Borg CR10 Scale for the evaluation of shoulder perceived fatigue during work-related tasks [J]. *Applied Ergonomics*, 2024, 116: 104200.
- [26] PENG C, ÖZTÜRK İ, NORDHOFF S, et al. Exploring user comfort in automated driving: a qualitative study with younger and older users using the Wizard-Of-Oz method [C]. *Adjunct Proceedings of the 15th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 2023: 342-345.
- [27] Mechanical vibration and shock. evaluation of human exposure to whole-body vibration. part 1. general requirements: ISO 2631-1 [S]. 2009.01.19.
- [28] 汽车平顺性试验方法: GB/T 4970-2009 [S]. 1985.03.02.
- Method of running test-automotive ride comfort: GB/T 4970-2009 [S]. 1985.03.02.
- [29] BAE I, MOON J, JHUNG J, et al. Self-driving like a human driver instead of a robocar: personalized comfortable driving experience for autonomous vehicles [J]. *arXiv preprint arXiv: 2001.03908*, 2020.
- [30] TAN Z, WEI J, DAI N. Real-time dynamic trajectory planning for intelligent vehicles based on quintic polynomial [C]. 2022

- IEEE 21st International Conference on Ubiquitous Computing and Communications (IUCC/CIT/DSCI/SmartCNS). IEEE, 2022: 51-56.
- [31] DU X, TAN K K. Autonomous vehicle velocity and steering control through nonlinear model predictive control scheme[C]. 2016 IEEE transportation electrification conference and expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). IEEE, 2016: 001-006.
- [32] YUSOF N M, KARJANTO J, TERKEN J, et al. The exploration of autonomous vehicle driving styles: preferred longitudinal, lateral, and vertical accelerations[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 2016: 245-252.
- [33] XU J, YANG K, SHAO Y M, et al. An experimental study on lateral acceleration of cars in different environments in Sichuan, Southwest China[J]. Discrete Dynamics in nature and Society, 2015, 2015(1): 494130.
- [34] ALBERTO R, TIWANA V, SERGIO I, et al. Surface electromyography for risk assessment in work activities designed using the "revised NIOSH lifting equation"[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2018, 68:34-45.
- [35] STAPEL J, GENTNER A, HAPPEE R. On-road trust and perceived risk in level 2 automation[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2022, 89: 355-370.
- [36] YANG Z, FU W H, ZHANG Z, et al. Comfort optimization of adaptive cruise control based on heart rate variability and fuzzy control[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 2010(1): 012176.
- [37] BEGGIATO M, HARTWICH F, KREMS J. Physiological correlates of discomfort in automated driving[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2019, 66: 445-458.
- [38] ZHENG R, NAKANO K, OKAMOTO Y, et al. Evaluation of sternocleidomastoid muscle activity of a passenger in response to a car's lateral acceleration while slalom driving[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2013, 43(4): 405-415.
- [39] ZHENG R, YAMABE S, NAKANO K, et al. Biosignal analysis to assess mental stress in automatic driving of trucks: palmar perspiration and masseter electromyography[J]. Sensors, 2015, 15(3): 5136-5150.
- [40] KIA K, JOHNSON P W, KIM J H. The effects of different seat suspension types on occupants' physiologic responses and task performance: implications for autonomous and conventional vehicles[J]. Applied Ergonomics, 2021, 93: 103380.
- [41] CHUANG S W, CHUANG C H, YU Y H, et al. EEG alpha and gamma modulators mediate motion sickness-related spectral responses[J]. International Journal of Neural Systems, 2016, 26(2): 1650007.
- [42] TEWARI V K, PRASAD N. Optimum seat pan and back-rest parameters for a comfortable tractor seat[J]. Ergonomics, 2000, 43(2): 167-186.
- [43] NORO K, NARUSE T, LUEDER R, et al. Application of Zen sitting principles to microscopic surgery seating[J]. Appl Ergon, 2012, 43(2): 308-319.
- [44] ZHANG T, REN J. Research on seat static comfort evaluation based on objective interface pressure[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2023, 16(02-16-04-0023).
- [45] 高开展, 罗巧, 张志飞, 等. 基于体压分布的汽车座椅振动舒适性评价[J]. 汽车工程, 2022, 44(12): 1936-1943.
- GAO K Z, LUO Q, ZHANG Z F, et al. Vibration comfort evaluation of vehicle seat based on body pressure distribution[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(12): 1936-1943.
- [46] 韩俊杰, 骆开庆, 邱健, 等. 基于双目相机的眼动仪头部姿态估计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 310-317.
- HAN J J, LUO K Q, QIU J, et al. Head pose estimation method of eye tracker based on binocular camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 310-317.
- [47] BUBB H, ESTERMANN S. Influence of forces on comfort feeling in vehicles[C]. SAE Paper 2000-01-2171.
- [48] ZACHER I, BUBB H. Strength based discomfort model of posture and movement[J]. SAE Transactions, 2004: 87-92.
- [49] PORTER J M, GYI D E. Exploring the optimum posture for driver comfort[J]. International Journal of Vehicle Design, 1998, 19(3): 255-266.
- [50] WOLF P, HENNES N, RAUSCH J, et al. The effects of stature, age, gender, and posture preferences on preferred joint angles after real driving[J]. Applied Ergonomics, 2022, 100: 103671.
- [51] SOARES G, DE LIMA D, NETO A M. A mobile application for driver's drowsiness monitoring based on PERCLOS estimation[J]. IEEE Latin America Transactions, 2019, 17(2): 193-202.
- [52] BERSENEV E Y, DUBININ V I, ERMAKOV V M, et al. Investigation of the psychophysiological response of passengers of fast trains with the different comfort level[J]. Hygiene and Sanitation, 2021, 100(4): 318-326.
- [53] GARCÍA-HERRERO S, GUTIÉRREZ J M, HERRERA S, et al. Sensitivity analysis of driver's behavior and psychophysical conditions[J]. Safety Science, 2020, 125: 104586.
- [54] GORELIK S, GRUDININ V, LECSHINSKIY V, et al. Method for assessing the influence of psychophysical state of drivers on control safety based on monitoring of vehicle movement parameters[J]. Transportation Research Procedia, 2020, 50: 152-159.
- [55] THOMAS B J, HEIDEN S, DYSON K, et al. The psychophysics of affordance perception: Stevens' power law scaling of perceived maximum forward reachability with an object[J]. Attention, Perception, & Psychophysics, 2023, 85(8): 2869-2878.
- [56] AO D, WONG P K, HUANG W, et al. Analysis of co-relation between objective measurement and subjective assessment for dynamic comfort of vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21: 1553-1567.
- [57] 郭子彬, 陈慧, 夏韬镨, 等. 弯道工况下驾驶员主观风险感知的量化研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(9): 1447-1455.
- GUO Z B, CHEN H, XIA T K, et al. Study on quantification of driver's subjective risk perception in curve driving condition[J].

- Automotive Engineering, 2022, 44(9): 1447-1455.
- [58] 唐传茵, 张义民, 赵广耀, 等. 基于烦恼率的悬架振动舒适性评价方法[J]. 机械工程学报, 2014(5).
TANG C Y, ZHANG Y M, ZHANG G Y, et al. An evaluation method of suspension vibration comfort based on annoyance rate [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014(5).
- [59] DONG R C, GUO L X. Human body modeling method to simulate the biodynamic characteristics of spine in vivo with different sitting postures [J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2017, 33(11): e2876.
- [60] PANKOKE S, BUCK B, WOELFEL H P. Dynamic FE model of sitting man adjustable to body height, body mass and posture used for calculating internal forces in the lumbar vertebral disks [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 215(4): 827-839.
- [61] AMIRI S, NASERKHAKI S, PARNIANPOUR M. Effect of whole-body vibration and sitting configurations on lumbar spinal loads of vehicle occupants [J]. Computers in Biology and Medicine, 2019, 107: 292-301.
- [62] GUO L X, DONG R C, ZHANG M. Effect of lumbar support on seating comfort predicted by a whole human body-seat model [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2016, 53: 319-327.
- [63] LIU C, QIU Y, GRIFFIN M J. Finite element modelling of human-seat interactions: vertical in-line and fore-and-aft cross-axis apparent mass when sitting on a rigid seat without backrest and exposed to vertical vibration [J]. Ergonomics, 2015, 58(7): 1207-1219.
- [64] MATSUMOTO Y, GRIFFIN M J. Modelling the dynamic mechanisms associated with the principal resonance of the seated human body [J]. Clinical Biomechanics, 2001, 16: S31-S44.
- [65] KIM T H, KIM Y T, YOON Y S. Development of a biomechanical model of the human body in a sitting posture with vibration transmissibility in the vertical direction [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, 35(9): 817-829.
- [66] LIANG C C, CHIANG C F. Modeling of a seated human body exposed to vertical vibrations in various automotive postures [J]. Industrial Health, 2008, 46(2): 125-137.
- [67] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, XIE X, et al. Musculoskeletal computational analysis of the influence of car-seat design/adjustments on long-distance driving fatigue [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2010, 40(3): 345-355.
- [68] DU X, SUN C, ZHENG Y, et al. Evaluation of vehicle vibration comfort using deep learning [J]. Measurement, 2021, 173: 108634.
- [69] ZHANG H, FU R. An ensemble learning-online semi-supervised approach for vehicle behavior recognition [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(8): 10610-10626.
- [70] ZHANG H, GUO Y, WANG C, et al. Stacking-based ensemble learning method for the recognition of the preceding vehicle lane-changing manoeuvre: a naturalistic driving study on the highway [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2022, 16(4): 489-503.
- [71] HUANG F, ZHAO C, HUANG Y, et al. Study on the evaluation model of vehicle comfort based on the neural network [J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(31): 553-558.
- [72] NGUYEN T, NGUYEN-PHUOC D Q, WONG Y D. Developing artificial neural networks to estimate real-time onboard bus ride comfort [J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(10): 5287-5299.
- [73] TAGHAVIFAR H, RAKHEJA S. Supervised ANN-assisted modeling of seated body apparent mass under vertical whole body vibration [J]. Measurement, 2018, 127: 78-88.
- [74] MOU L, ZHOU C, ZHAO P, et al. Driver stress detection via multimodal fusion using attention-based CNN-LSTM [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 173: 114693.
- [75] LIU H, HUANG W. The research of drivability evaluation index and quantitative method [C]. SAE Paper 2016-01-1906.
- [76] KIA K, JOHNSON P W, KIM J H. The effects of different seat suspension types on occupants' physiologic responses and task performance: implications for autonomous and conventional vehicles [J]. Applied Ergonomics, 2021, 93: 103380.
- [77] RUBIRA FREIXAS M. Effects of driving style on passengers comfort: a research paper about the influence of the bus driver's driving style on public transport users [J]. 2016.
- [78] ZHU W, ZHANG X, HU C, et al. Passenger comfort quantification for automated vehicle based on stacking of psychophysics mechanism and encoder-transformer model [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023.
- [79] BELLEM H, THIEL B, SCHRAUF M, et al. Comfort in automated driving: an analysis of preferences for different automated driving styles and their dependence on personality traits [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2018, 55: 90-100.
- [80] BAE I, MOON J, KIM S. Driving preference metric-aware control for self-driving vehicles [J]. International Journal of Intelligent Engineering & Systems, 2019, 12(6).
- [81] RAO M V C, PRAHLAD V. A tunable fuzzy logic controller for vehicle-active suspension systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 85(1): 11-21.
- [82] ORABY W A H, EL-DEMERDASH S M, SELIM A M, et al. Improvement of vehicle lateral dynamics by active front steering control [J]. SAE Transactions, 2004: 1101-1110.