

分类号: _____

单位代码: _____

密 级: (注明密级与保密期限) _____

学 号: _____

中国传媒大学

硕士专业学位论文



中文论文题目: 纯电汽车的个性化主动声音设计研究

英文论文题目: **Research On Personalized Active Sound**

Design For Battery Electric Vehicles

申请人姓名: _____

指导教师: _____

专业名称: _____ 音乐

研究方向: _____ 录音

所在学院: _____ 音乐与录音艺术学院

论文提交日期 2026.03.23

中国传媒大学研究生学位论文独创性声明

本学位论文作者声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 **中国传媒大学** 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。其他个人或组织对本研究所做的任何贡献，均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

作者签名：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 **中国传媒大学** 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。论文作者授权 **中国传媒大学** 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印、扫描或拷贝等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

作者签名：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

关于使用人工智能的诚信声明

本学位论文作者郑重承诺：关于人工智能使用情况的声明和陈述真实无误，已对使用此类技术的所有细节进行了全面且诚实的报告（详见附录中《关于人工智能使用的声明》）；对于人工智能辅助完成的内容，已进行严格审查和修改，参考文献中不含 AI 为作者的论文；作品中根据实际情况已添加了显式标识或隐式标识。本人深知学术诚信的重要性，如经查实存在违法违规使用人工智能的情况或未声明的使用行为，本人自愿承担由此导致的学术不端责任。

作者签名：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

纯电汽车的个性化主动声音设计研究

摘 要

由于新能源动力的发展，传统内燃机动力源依赖不可再生资源且对环境污染较大而逐渐减少，电动汽车使用更加清洁的能源，且获得高动力的成本降低得以迅速发展。但电动汽车在声音上带来了新的问题，特别是纯电汽车，相较于燃油汽车在声音上需要解决的噪声问题，纯电汽车的问题则是它过于安静，在低速行驶时行人很难注意到行驶的车辆，并且由于缺乏声音上带来的驾驶反馈，驾驶员并不能通过声音判断车辆行驶状态，而且少了驾驶时声音所带来的驾驶体验。基于此，对纯电汽车进行主动声音设计(ASD)非常有必要，在低速行驶时设计行人警报音(AVAS)，车内可设计受驾驶行为控制的主动发声系统用来提示车辆行驶信息以及提升驾驶时的声音反馈。但由于现目前纯电汽车的主动声音还是以模仿传统燃油机声音为设计目标，缺乏突出品牌特性的声音设计，而且由于纯电汽车安静的声音环境，可以对其实现更多传统燃油车所不能达到的声音效果，所以纯电汽车的个性化主动声音设计可以丰富驾驶体验，体现品牌价值。

为实现个性化的主动声音设计，本文首先从现有的车型入手，对目前已上市车型主动声音设计进行调研，分析不同车型的 AVAS 音效特征和声浪模拟设计，其次是对用户的需求和偏好进行调研，分析调研结果并总结现有设计的优缺点，把握个性化设计的方向。

其次是进行声音设计，在了解相关法规的基础上，从三个不同风格的声音效果入手，设计个性化的 AVAS 音效，并根据驾驶场景和路况设计自适应转换系统增加声音设计的丰富度。车内的主动发声系统从模拟声浪和互动音乐两种模式开始设计，设计三种不同风格的模拟声浪和两种互动音乐驾驶模式。然后是在声音设计的基础上搭建模拟驾驶环境，选用 Wwise 声音引擎和 Unreal Engine 搭建软件环境，再选用相应的模拟控制器和声音还原系统搭建硬件环境。

最后是对声音设计进行主客观评价，选用一定的实验方法(语意细分法、成对比较法、等级评分法、数值估计法等)，选定主观评价变量，AVAS 评价变量从辨识度、舒适度、警示性、清晰度等维度评价；声浪模拟评价变量从动力感、舒适度、氛围感、豪华感等评价词进行主观评价实验，同时选定响度、尖锐度、粗糙度等心理声学参数对设计

好的声音进行客观评价，然后分别对主观评价与客观评价做数据分析，分析主客观参量的相关性，总结出纯电汽车主动声音的个性化设计方向。

关键词：主动声音设计；纯电汽车；声音设计；主客观评价

RESEARCH ON PERSONALIZED ACTIVE SOUND DESIGN FOR BATTERY ELECTRIC VEHICLES

ABSTRACT

With the rapid development of new energy powertrains, traditional internal combustion engine vehicles—which rely on non-renewable resources and generate significant environmental pollution—are gradually declining in use. Battery electric vehicles (BEVs) utilize cleaner energy sources and have achieved high performance at reduced cost, enabling swift market growth. However, BEVs introduce new acoustic challenges. Unlike conventional fuel-powered vehicles, which primarily face noise reduction problems, pure electric vehicles suffer from excessive quietness: at low speeds, pedestrians often fail to detect approaching vehicles, drivers lack auditory feedback to assess vehicle status, and the overall driving experience is diminished by the absence of engine sound. Accordingly, Active Sound Design (ASD) for BEVs is highly necessary. At low speeds, an Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS) can be designed to warn pedestrians, while inside the cabin, an active sound generation system responsive to driving behavior can convey vehicle information and enhance auditory feedback. Nevertheless, current ASD implementations still predominantly imitate traditional combustion engine sounds, lacking distinctive brand identity, and fail to exploit the acoustic potential that the inherently quiet BEV environment affords. Personalized active sound design therefore represents a promising direction for enriching the driving experience and expressing brand value.

To realize personalized active sound design, this study first investigates existing ASD implementations across commercially available BEV models, analyzing the acoustic characteristics of AVAS sounds and engine-sound simulation strategies. A user survey is then conducted to capture consumer needs and preferences; survey results are analyzed to identify

strengths and weaknesses of current designs and to establish the directions for personalized design.

Subsequently, sound design is carried out: building on relevant regulations, three stylistically distinct AVAS sound effects are developed for exterior alerting, and an adaptive transition system is designed according to driving scenarios and road conditions to increase acoustic variety. For the in-cabin active sound generation system, both simulated engine-sound and interactive music modes are developed, yielding three engine-sound simulation styles and two interactive music driving modes. A simulated driving environment is then constructed using the Wwise audio engine and Unreal Engine as the software platform, complemented by appropriate simulation controllers and sound reproduction hardware.

Finally, the sound designs are evaluated both subjectively and objectively. Selected psychoacoustic evaluation methods—including semantic differential, paired comparison, rank-order scaling, and magnitude estimation—are applied with defined subjective evaluation variables (e.g., recognizability, comfort, alertness, and clarity for AVAS; and power feel, comfort, ambience, and luxury for engine-sound simulation). Simultaneously, objective psychoacoustic parameters such as loudness, sharpness, and roughness are measured. Statistical analyses are performed on both datasets, the correlations between subjective and objective metrics are examined, and conclusions are drawn regarding the personalized design directions for BEV active sound.

KEYWORDS: active sound design; battery electric vehicle; sound design; subjective-objective evaluation

目 录

绪论	11
研究背景及意义	11
国内外研究现状	12
主要研究内容与思路	15
第一章 汽车主动声音设计的市场调研	17
第一节 现有汽车的主动声音设计	17
一、不同车型的 AVAS 音效特征	17
二、主动声浪模拟的设计与区别	26
第二节 用户需求与偏好调研	29
一、调查对象选择与问卷设计	29
二、AVAS 音效反馈与偏好	31
三、主动声浪模拟的反馈与偏好	38
第三节 现有设计的优缺点	44
一、优点	46
二、存在的问题	46
三、改进方向——个性化设计	48
第二章 个性化主动声音设计	49
第一节 AVAS 音效设计	49
一、相关法规	49

二、个性化设计思路	51
第二节 车内主动声音设计	59
一、个性化声浪模拟	59
二、互动音乐驾驶	66
第三章 声音集成与模拟驾驶环境	73
第一节 系统架构	73
一、整体框架与数据流	73
二、软硬件选型依据	74
第二节 硬件系统搭建	76
一、控制输入系统	76
二、音频重放系统	77
第三节 Wwise 音频工程搭建	78
一、工程结构与资源组织	78
二、互动逻辑设计	81
三、RTPC 控制与参数调节	84
第四节 Unreal Engine 虚拟场景搭建	86
一、驾驶场景设计	86
二、车辆动力模拟	88
第五节 声音集成	91
一、集成流程	91
二、触发机制	93
第四章 主客观评价实验设计与实施	96
第一节 实验总体设计	96
一、研究目的与实验概述	96

二、变量设计	97
三、流程规划	98
第二节 主观评价	98
一、被试者筛选	98
二、评价量表设计	99
三、实验流程	100
第三节 客观评价	102
第四节 实验数据与结论分析	103
一、数据预处理	103
二、主观评价结果分析	103
三、客观参数分析	109
四、主客观相关性分析	110
五、综合讨论与设计建议	113
第五章 总结与展望	115
参考文献	117
附录	1

绪论

研究背景及意义

随着电动化技术的发展，全球汽车产业逐渐由燃油动力向混合动力最终向纯电动力发展转型，2020 年后全球主要国家陆续发布禁止燃油车售卖的时间，碳中和、碳达峰等环境目标倒逼车企从燃油动力转型为纯电动力，新能源汽车的补贴政策的持续推进也增加了普通购车者对纯电汽车的购买欲。同时新能源汽车的市场也在快速增长，2022 年全球新能源汽车销量突破 1000 万辆，同比增长 55%，中国新能源汽车的渗透率也从 2020 年的 5.4% 增长至 2025 年的 57.8%，2030 年全球电动汽车的保有量预计将超过 2 亿辆。这得益于纯电汽车的技术成熟度的提升，电池技术的发展与充电基础设施的日益完善，使得纯电汽车续航不再是一个痛点问题，最低平均每公里 0.05 元的价格也让使用成本上优于燃油汽车，智能化水平也相比同价位的燃油车更为先进，所以纯电汽车已经从小众市场进入了大众消费阶段。

纯电汽车由于没有内燃机的机械运动与进气和排气的声音，在低速行驶时几乎无声，研究表明电动汽车在低速时与行人碰撞的概率比燃油车高 40%， “过度安静” 给车外的行人（特别是视障人群）形成了威胁，行人无法通过听觉感受到车辆的靠近，电动汽车在低速行驶时过于安静所造成的交通事故也受到了关注。为纯电汽车安装低速行驶的警报音（AVAS）已经成为国家硬性的规定，GB/T 28382-2012《纯电动乘用车技术条件》中，首次要求纯电动汽车在低于 20km/h 车速时发出适当声响。但 AVAS 不仅只是汽车的警示声音，它除了最基本的提示作用外，还是构成城市声音景观的一部分，对于不同场景的 AVAS 最好是能融入该路况的声景，而且还能起到提示行人的基本作用，如此设计的 AVAS 可以降低城市环境中的噪声污染，并且 AVAS 声音不仅车外能听到，同时也能传递到车内，该声音对于车内的声品质也会有影响。但国内纯电汽车目前设计的 AVAS 还只停留在最基本的警示音效，还是以模仿传统的发动机声音为主，并未对上述改善环境噪声做相应的设计，优秀 AVAS 声效不仅是汽车声音的一部分，还能体现车企的品牌价值与用户的情感认同，成为该品牌独特的声音形象，所以个性化的 AVAS 设计是值得

研究的话题。

目前主动声音模拟技术除了车外行人警示音（AVAS）外，还有车内发动机声浪模拟和车内功能提示音两类。驾驶舱内的主动声音设计（ASD）旨在有目的地创造、增强或修改传递到电动汽车驾驶舱内部的声音，核心要点在于主动地塑造驾驶舱的听觉环境，而不是被动地接受车内运行而产生的自然声音。纯电汽车由于缺乏传统的发动机声音，会使得电机的高频啸声更加刺耳，内燃机在工作时会产生随着转速变化的轰鸣声，该声音不仅传递了如车速、转速等车辆状态信息。高端燃油车品牌通过对发动机的声音进行有意的设计与控制，从声音上建立品牌辨识度，纯电汽车安静的驾驶舱环境更有利于重构声场。从原来被动地接收到现在主动地去设计想要听到的声音，用户需求从被动接收到主动选择的转变，纯电汽车的舱内主动发声系统的设计也是驾驶体验和品牌形象的一部分。汽车内过于安静会导致驾驶的反馈感缺失，引擎所产生的声音会给驾驶员关于车速的声音提示信号，甚至容易出现频繁看表或者不知情的超速现象。所以对于纯电汽车而言，给予车内一定声音反馈是非常重要的，这种主动设计的声音可以提高车内的声品质，甚至可以提升驾驶乐趣。

伴随着消费升级与生活水平的提高以及智能座舱概念的普及，汽车从交通工具逐渐转化为“移动的第三空间”，用户对于车内空间的声音美学体验要求会更高。从手机个性化铃声、游戏定制化的 UI 交互音效、智能家居的个性化定制语音等其他消费产品可以看出，个性化的声音设计不仅仅在品牌方建立起品牌形象，用户在满足基本的声音需求之后，对个性化、定制化的声音体验也有很高的需求，用户早已经习惯了个性化的声音体验。然而目前阶段的大部分纯电汽车的主动声音设计还处于模仿传统燃油车的声音阶段，每个车型之间缺乏突出自身特点与定位的独特声音体验，纯电汽车相对安静的座舱环境给个性化的主动声音设计提供了更多的可能性。本文将从用户需求出发，研究多种个性化主动声音设计的可能性，设计出多种风格的 AVAS 音效与声浪模拟，搭建模拟驾驶环境，并对声音进行主客观评价，分析实验结果并对未来纯电汽车的个性化主动声音设计提出相应的建议。

国内外研究现状

波尔图大学的 Ana Raquel Rodrigues Ferraz Esteves 与 FINAL VERSION，探讨了

纯电汽车声音设计的当前开发状态，在声音化、人机交互、声音设计和环境等考虑因素的前提下，对现有品牌的电动汽车 AVAS 系统进行了分析，设计出最符合上述考虑因素的 AVAS 声音。研究思路以低保真与高保真声景的特点为基准，使用 Ableton Live 的 Simpler 与 Kilohearts 的 Phaseplant 合成符合目标声景的 AVAS 声音设计，Wwise Automotive 负责声音的互动设计，最后把声音集成到搭建好的 Unity 模拟驾驶场景中并进行主观评价实验。实验结果发现，对于高保真声景来说，汽车声音最好是离散且平滑的，类似于自然和音乐旋律的音响，并在各个频点做相应的设计，对于车内的体验也需要考虑；而低保真声景最好是频率较低的低沉的声音，随着速度的增加背景噪声的比例减少，但仍然需要突出低频。通过此次研究，可创建一个自适应的 AVAS 系统，可在不同路况中按照声景需求自由切换。该研究对于本选题来说提供了基本的研究思路，其中对不同车企不同车型的 AVAS 声音的调查与分类，对于本选题的个性化主动声音设计提供了大量的分析材料；第三章中电动汽车的环境自适应声音的设计思路与模拟驾驶测试环境的搭建，对于本选题来说提供了可借鉴的研究思路；第四章对主观评价实验的结果分析为本选题提供了实验分析方法。

吉林大学的邱森对加速工况时车内的声品质进行了评价与优化，该研究选取了 34 款不同品牌的车辆，对其加速工况的车内噪声进行测试采样，并计算了各自的心理声学客观参数。结合主观评价实验，采用语意细分法与因子分析法对样本进行评价分析，并通过相关性分析和多元线性回归分析分别建立以心理声学客观参数来述舒适感因子得分和动力感因子得分的数学模型。最后对比了试验车与对标车的声品质，分析产生动力感因子与舒适感因子变化的原因，基于传递路径合成（TPS）技术建立车内噪声的合成等效模型。该研究对于本选题的声音评价方面具有很好的参考价值，文中所采用的声品质评价方法，以及研究的论证过程，尤其是主观评价所采用的语意细分法与因子分析法等方法，以及实验数据的分析方法和评价模型的建立，对于本选题来说是难得的方法论依据。论文的第一章也介绍了声品质评价的客观心理声学参数以及一些心理声学理论也是重要的文献资料。

重庆理工大学的姜诚勇讨论了纯电汽车的主动发声系统与车内的声品质优化。此研究首先分析了发动机产生噪声的原理，然后选取了某款赛车游戏的发动机声音并对其在 3 种基本工况下进行阶次分析，最后选取了粒子合成算法作为此研究的声音合成算法。为了增强动力感，对合成的声音进行阶次分析，加强或衰某些阶次，再制定主观评价实

验，最后基于线性回归搭建声品质评价模型。在文章的最后对声品质优化进行了研究，以动力感最优为目标进行优化，方法是基于正交试验分析不同的阶次幅值对动力感声品质的贡献度，再计算各组合方式的动力感得分，得到的最优动力感组合再进行二次主观评价。该研究第二章中发动机的噪声产生原理以及合成设计思路可作为本选题的文献资料和研究方案，特别是对不同工况下的声音合成的频率分析，可作为发动机声音合成的参考；第三章中对动力感的声品质研究中，以添加和减少不同阶次配比的方式展开阶次分析，结果表明当增强偶次阶次时，动力感会明显上升，该结论对于纯电汽车的主动声音设计具有很好的参考意义。

吉林大学的曹蕴涛的研究以国内某 A 级纯电动 SUV 为研究对象，旨在解决由于电动汽车动力的变革导致车内过于安静的问题，该研究发现目前的主动声音设计过于同质化。作者开展了电动汽车车内声音发展趋势调查，并建立了发动机阶次声音数学模型：首先是分析电动汽车的 NVH 变化趋势，结果表明目前的声音需求是多元化的；其次是分析了燃油汽车和电动汽车的行驶声音用来建立阶次声音模型；随后是制定了车内声音设计以阶次构成、频谱能量分布、典型车速范围三个维度，根据以上维度设计了车内发声硬件系统；最后总结了主动发声系统的流程。该研究从调研开始到最后的硬件落地，完整的声音设计与实现流程为本研究提供了流程化的参考。

王涛等人的研究提出并实现了一种“可变权重的多模式切换声音合成算法”。研究者通过构建模式切换因子矩阵，将阶次合成、变调合成和粒子合成方法进行有机结合，形成深度声融合 ASE 系统提升了座舱的听觉丰富度；然后根据上述合成方案用 C# 语言开发了车内的声浪调制软件；最后将设计的调制软件在某纯电 SUV 中调制应用并进行测试与主观评价，结果显示该声音调制软件可实现多种调制合成目标，具有实际应用价值。

杜颂泽等人基于 MATLAB 平台开发了一套 ASD 离线仿真软件，该软件集成了阶次合成 OS、频移合成 FSS、粒子合成 PS 三种声音合成算法，可模拟车辆工况、评估声学性能，还能与 DSP 硬件平台集成，解决了当前 ASD 开发时车调试周期太长的问题。论文中公开了软件开发细节与算法原理，可作为软件的使用与技术指南。该软件对于制作个性化的 ASD，体现品牌效应、增强车与人的交互性提供了便利的开发工具。

德国 neosonic 公司的 Markus BODDEN 与 Torsten BELSCHNER 分析了电动汽车相较于传统燃油汽车在声音上的差别，提出主动声音设计的方案与基本原则，提倡电动汽

车的声音设计必须提供远超出仅仅关联车速的基本合成方法，更需要的是创造多样化的声音组件动态关联车辆行为。将声音特征分为了基础声音特征、子特征、微特征，并通过调整不同特征的权重衍生出不同品牌的聲音特征。在应用方面，该公司还开发了可用于纯电汽车个性化声音设计的高效开发工具 **neosonic elvis³** 系统，该系统给电动汽车的声音设计提供了巨大的便利。该研究对本选题的中样本声音设计具有很好的参考意义，其中提出的最基本的安全提示与心理声学要求，是在设计中需要考虑的基本问题。

中国汽车技术研究中心的谢东明等人基于 GB/T 37153-2018《电动汽车低速提示音》的指标，通过验证实验和对照相应的法规解析标准中的疑难点问题，试验采用整车开展，并选用了“动感”“正常”“音效”三种模式分别测量了总声压级、三分之一倍频程声压级和频移等三个项目。该研究还讨论了国内外 AVAS 提示音效的主动开关与安装位置，对于相关规定的完善具有指导意义。

中国汽车工程研究院的苏星溢等人对电动汽车低速行驶时的 AVAS 声音进行了室外场地的整车运行试验，并对现有的 AVAS 系统提出了要求，指出目前 AVAS 警示音还处于模拟发动机噪声，较为枯燥单调，在满足国家标准上开发具有个性化的警示音仍然需要探索。

主要研究内容与思路

目前车企纯电汽车的主动声音设计还处于实现符合要求的基本功能为主，对于竞争激烈的纯电汽车市场，可以在符合基本规定的前提下，设计出更加个性化的汽车交互声音。给纯电汽车设计独特、可识别、能传递品牌核心价值的声音标识，可以在声音方面建立起与用户的情感联系，增加用户对车企的品牌认同。车企对目前纯电汽车的车外行人警报声（AVAS）设计还是以模拟传统内燃机的声音为主，但模仿以前燃油汽车的提示音并不是最终的设计目标。纯电汽车的安静其实给汽车的声音带来了更多的可能性，设计出具有个性化的 AVAS 不仅可以体现品牌价值，还可以减少城市的噪声污染，使城市的声音景观更加美好。本选题的创新性就在于个性化的主动声音设计，超越目前以还原传统燃油车的声音为设计目标的主动发声系统，设计出更加具有环保，更加能体现品牌形象与差异，更能增加驾驶乐趣的纯电汽车主动声音设计方案。在纯电汽车车内声音设计上，本选题参考传统声浪设计，从原理出发，以提示车况变化与驾驶正反馈这两点设

计为基本，从电子游戏中互动音乐设计得到灵感，设计一款随着踏板深度与转速变化而变化的互动音乐形式的声浪设计，结合转向提示等车内音效，整合为音乐驾驶模式，替代传统在车内播放音乐的场景，让音乐与驾驶结合起来，并且能传递基本的车况信息。

本选题由于跨学科较大，对于学科的综合能力要求比较高，所以前期工作主要以阅读相关文献，学习与选题相关的知识为主，搭建好基本的知识体系，为之后的研究做好理论基础。其次是调研现有纯电汽车的主动声音设计，包括 AVAS，车内合成声等，分析其在声音设计方面的特点与设计思路，总结出品牌特征与车型区别，为之后的声音合成做准备。然后是设计纯电汽车的主动发声系统的声音，结合市面上的纯电汽车的设计思路，通过声音合成软件（如波表合成器、粒子合成器等），设计出目标声音，目标声音的设计应符合前文所说的审美需求，并且尽量做出不同风格的差异化，为之后的主客观评价实验做好素材准备。再次是搭建模拟驾驶环境，可使用目前已经成熟的互动声音引擎（如 Wwise）与虚拟场景模拟引擎（如 Unreal Engine\Unity 3D）结合，把设计的声音首先按照互动的需求在 Wwise 中设计好，再把它集成到模拟引擎中，模拟引擎需要模拟出真实的驾驶路况与场景，同样为了更加真实地模拟效果，最好也要对模拟的环境进行声音设计，以还原真实的驾驶场景。驾驶互动可以用模拟踏板与方向盘，被试者通过视觉观看驾驶画面，触觉反馈用模拟踏板与方向盘来提供，声音反馈通过集成到引擎中的声音提供，试验场景可选择室内沉浸式多声道听音环境，其次是选择使用双耳渲染的耳机监听。最后是对主客观实验的结果进行数据分析，分析客观心理声学参数与主观听音实验的相关性，提取出能够为更好地汽车主动声音设计的结论。

第一章 汽车主动声音设计的市场调研

本章首先对不同品牌车型的 AVAS（车辆低速行驶提示音系统）音效系统进行市场调研，通过专业的测试与录制设备对样本车型在特定工况下的音效进行录制，然后分析不同样本的声学特征与主观听感差异；其次是调研市面上的主流车型的“主动声浪模拟”功能，从可调性、功能性、音色特征、主观听感等多维度特性出发，并结合频谱图分析各个品牌车型的音色特征，最后总结现有电动汽车的主动声音设计的分类特点。除了调研现有车型的主动声音设计之外，本研究还对用户进行了问卷调研，从 AVAS 音效和主动声浪两个方面设计问卷，详细地分析了问卷调查的结果。

第一节 现有汽车的主动声音设计

通过对现有的纯电汽车的主动声音设计进行市场调研，从 AVAS 音效特征和模拟声浪的音色特征两个方面进行调查分析，并根据符合要求的工况与驾驶场景测量并从频率、声压级、响度、情感倾向等多个方面分析数据，总结出各个品牌现有车型的主动声音设计的特点，为后续设计个性化的汽车音效提供设计思路。

一、不同车型的 AVAS 音效特征

从市面上畅销的主流电动汽车车型入手，涵盖不同品牌的代表性车型，对目标车型的 AVAS 音效按照符合规定的工况和场景录制声音样本。然后把采集的声音样本从客观声学参数和主观听感等多个维度分析其音色特征，不同音色特征分类对比，结合频谱特征总结现有 AVAS 设计的特点与可以改进的方向。

（一）调研方法与样本选择

由于电动技术的发展和智能电动汽车概念的普及，现在市面上存在的电动汽车品牌与车型已经相当丰富，本研究要想全面地了解和分析各个车型 AVAS 音效特征，就必须对选定车型进行系统的调研和测量以把握现状和未来发展趋势。选定目标车型，采用实地调研加声学测量双重方式，保障调研结果的客观性。调研时间从 2025 年 7 月到 9 月

总历时三个月，调研场景包含 4S 店、新能源体验中心、公共充电桩、专业汽车测评机构等。

为了确保录音样本的专业性和准确性，本研究需要采用专业的录音与声学测量设备。查阅相关设备的功能性与本研究的适配性，AVAS 音频样本的录制与采集使用 Zoom H6 这款便携式录音设备，该产品不仅方便携带而且具有高采样录制的功能，在前期保障基本的录音质量；声音测量设备选用 HEAD Acoustics HMS III.0 测量系统，该系统是汽车声学行业的标准测量系统，不论是在频谱分析还是在基本声学参量（声压级、响度、尖锐度等）的测量都具有很高的精准度。数据分析采用配套 HEAD Artemis Suite 声学分析软件对样本的更多客观心理声学参数分析，然后再使用 DAW（数字音频工作站）进一步对样本进行更复杂的编辑和音频处理，声学分析软件与 DAW 的配合可大幅提升调研工作的效率。

在样本选择方面需要制定一定的选择标准，以确保调研具有客观性和代表性。首先所选车型必须配备 AVAS 系统，这是调研工作开展的前提；其次车型样本不能过于集中于某一品牌和类型，需要尽量覆盖市面上售卖车型的真实情况，轿车和 SUV 等不同车型都要包含在内，可参考市场销量排名筛选各个品牌代表性车型；除了不同车型的选定，不同品牌的选定也要限制，避免因定价差异的原因导致样本失衡，所以既要包含传统豪华品牌（奔驰、宝马、奥迪等），也要加入新势力造车品牌（蔚来、小米、理想等），品牌选定还需要涵盖国内与国外用以分析国内外的差异；最后样本选定的车型还需要考虑不同的价位段，20-100 万的不同定价区间的车型都需要覆盖，可分析不同市场定位的产品在声音设计上的差异化策略。综合考虑上述选定标准，最终选定上市时间在 2019 年到 2024 年的 12 种不同品牌的车型。

序号	品牌	车型	定位	价格区间 (万元)	上市时间	声音系统供应商
1	奔驰	EQS	豪华旗舰	84.50-151.86	2021	Harman+Mercedes-Benz 自研
2	宝马	iX	豪华 SUV	74.69-99.69	2021	BMW IconicSounds Electric

续表 1.1

序号	品牌	车型	定位	价格区间 (万元)	上市时间	声音系统供应商
3	奥迪	e-tron GT	豪华轿跑	85.88-108.68	2021	Audi Sound Design+Bang & Olufsen
4	保时捷	Taycan	豪华跑车	88.80-183.80	2019	Porsche Electric Sport Sound
5	特斯拉	Model 3	中型轿车	22.99-33.99	2019	Tesla 自研
6	蔚来	ET5	中型轿车	29.80-35.80	2022	蔚来数字座舱团队
7	理想	L9	大型 SUV	42.98	2022	理想汽车音频团队
8	小鹏	G9	中大型 SUV	26.39-35.99	2022	Xopera 音响系统
9	问界	M7	中大型 SUV	24.98-32.98	2022	华为 HarmonyOS 智能座舱
10	小米	SU7	中大型轿车	21.59-29.99	2024	小米汽车声学团队
11	比亚迪	汉 EV	中大型轿车	17.98-28.98	2020	Dilink+DiSus
12	极氪	001	中大型轿跑	26.90-32.90	2021	吉利汽车声学工程

表 1.1 调研车型基本信息

（二）AVAS 音效采集与分析

为了确保准备无误地采集到声音数据，需要认定每一个样本车型都在同一个环境中录制完成。测试环境选择空旷的停车场或安静的室内试验场，环境噪声要控制在 40dB(A) 以下，才能最大程度地降低背景噪声对实验数据的影响，测试工况选择样本车辆从静止到加速至 30km/h 的标准起步加速工况，这个速度区间满足 AVAS 系统启动并发挥作用时的场景，同时也是行人最需要通过主动发声来感知车辆靠近的关键速度区间（大于 30km/h 依靠风噪和胎噪即可确认危险车辆）。测量的位置选择在样本车的前方 2 米和侧方 2 米，模拟行人在不同方位真实的听音感受，为了能够捕捉到完整加速过程的声音变

化，应该对每一辆车反复测试三遍，然后再对采集的数据取平均值的方式提高数据的可靠性，减少因为环境声音干扰导致的偶然误差。

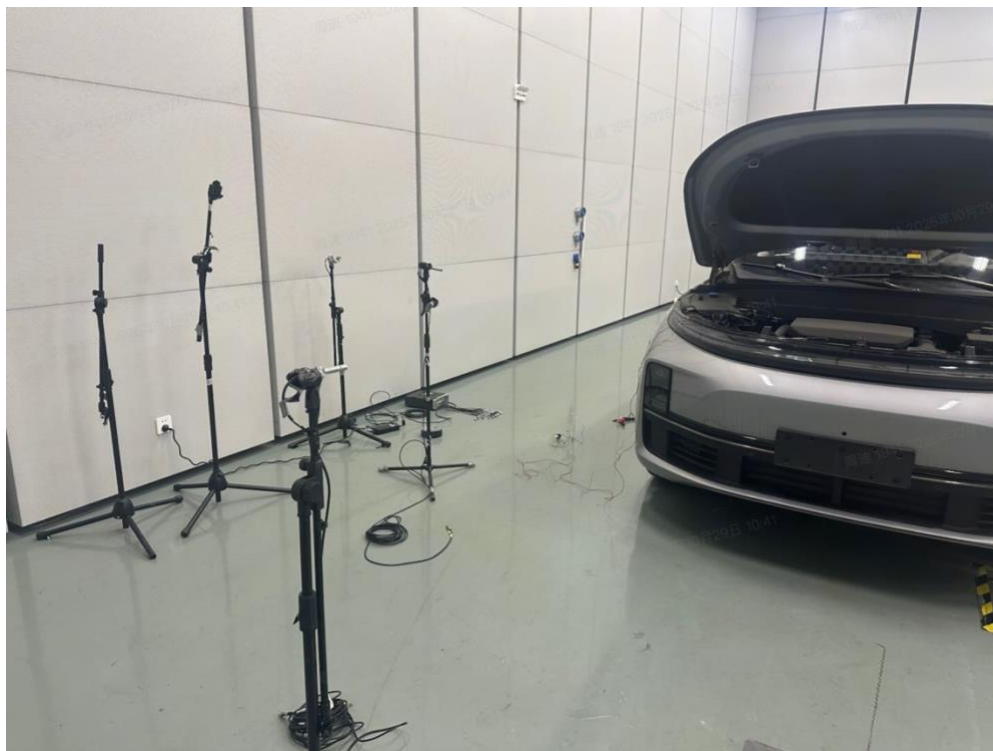


图 1.1 AVAS 音效采集试验现场

AVAS 音效采集完成之后还需要对采集的音效样本进行客观和主观等多个维度分析。客观维度首先是分析样本音频的时域和频域特征，分析时域图可以得到车辆动态的声音变化、不同时间段的聲音特性和声压级大小；分析频域特性可以反映聲音的音高特性和音色特征，从不同的谐波成分中可观察到聲音在可听频率范围内的能量配比，方便对比不同音色特征，为后续设计声音做参考。其次是响度、尖锐度、粗糙度等客观心理声学参数的测量，测量这些参数可从客观数值中反映人耳的听音感受。主观维度是从音色特征和情感倾向做主观听感评价，一些难以用客观参数表达的听音感受可通过定性主观评价语言来描述。这种客观测量加主观评价模式建立了更加立体化的 AVAS 音效分析框架，为后续的调查问卷和个性化声音设计搭好了基础的音色感知基础。

车型	主频率范围(HZ)	音色特征	声压级 @5KM/H (DB(A))	响度 (SONE)	尖锐度 (ACUM)	情感倾向
奔驰 EQS	200-800	圆润低沉	56	15.2	1.1	沉稳、豪华
宝马 IX	150-1000	层次感丰富	58	16.8	1.3	未来、科技
奥迪 E-TRON GT	100-600	浑厚低频	60	18.1	1.0	强劲、运动
保时捷 TAYCAN	80-500	纯净力量	62	19.5	0.9	性能、激情
特斯拉 MODEL 3	400-1500	简约实用	54	13.5	1.6	极简、理性
蔚来 ET5	300-1200	亲切温和	55	14.8	1.4	友好、舒适
理想 L9	250-900	温馨柔和	53	13.2	1.2	温暖、居家
小鹏 G9	350-1400	智能清新	57	15.6	1.5	智能、活力
问界 M7	280-1000	现代和谐	56	14.9	1.3	和平、智慧
小米 SU7	200-1100	动感年轻	58	16.2	1.4	热血、运动
比亚迪汉 EV	300-800	实用中性	55	14.3	1.2	务实、稳重
极氪 001	250-1200	科技精致	57	15.8	1.3	前卫、时尚

表 1.2 各车型 AVAS 特征分析

（三）品牌特征归纳

通过对比分析发现，现有车型的 AVAS 音效存在一定的差异化特性。针对不同用户群体以及车型的定位，不同品牌对 AVAS 声音的设计也不尽相同，为了方便归纳，现对

市面上的 AVAS 音色特征作类别区分，可分为以下四种主要类型：

1. 豪华典雅型

此类型是以奔驰、蔚来的车型为代表，表现出明显的“以少为多”的克制美学风格。首先它的声音频率集中在 200-800 的低频区域，这个频段是人耳的低频舒适频段，既不会有刺耳的毛躁感，也不会有低频的轰隆感。其次其响度控制和尖锐度都处于较低范围内，体现了奔驰以舒适豪华为主的风格和市场定位。

这种风格设计想要传达的是一种低调奢华的气质，豪华典雅风格形成的原因与设计师在频率和动态上的巧心处理相关。为了体现高级感和奢侈感，在设计此类风格声音的时候需要有意地避免具有攻击性的中高频和超低频，保留柔和的中低频，营造出一种优雅从容的行驶氛围。声音在动态上变化比较缓和，不会出现大幅度的音量起伏，随着速度的提升只是做了平缓的移频处理。“气流涌动”和“天鹅滑翔”等主题音效与自然现象结合，传递了平稳从容、豪华典雅的品牌气质，符合其目标用户对奔驰品牌追求生活品质的定位，这些用户更注重产品所传达的内涵与情感，看重品牌调性和超出产品本身的符号价值。

2. 科幻未来型

宝马、小鹏、问界等品牌的设计策略与奔驰不同，奔驰看重更加持续稳定的声音输出，而宝马则更加体现科幻未来的音色特性。在音色设计上，科幻未来型采用多重谐波控制和电子音色合成的组合方式，丰富的谐波结构与电子合成音色相互叠加，制造出有别于传统的音响效果。它的主要的频率范围变为 150-1000 的宽频段，响度和尖锐度相较于奔驰，其数值更高，音色更具有穿透力和辨识度。

这类声音设计的是电动汽车“电驱动”属性在声音方面的强化，体现的是有别于传统燃油汽车声音的科幻感与未来感。利用电子合成技术创造自然界不存在的音响效果，由此来确立该品牌独特的音色审美风格，专属于电动汽车的独特声响。声音的动态响应非常敏锐，能够快速反应驾驶行为和行驶状态，增强人机交互的及时性。其目标用户为追求时尚和科技的年轻消费群体，对新鲜事物的接受度较高，能够快速适应全新的设计风格和超越自然的合成音效，品牌打造的声音形象体现了其科技未来的企业形象，增强了车与用户之间的情感连接，车不仅是代步工具，更是年轻人追求潮流的形象外显。

3. 运动性能型

运动性能型以小米、保时捷、奥迪等品牌为代表，该风格具有强有力的低频能量，在声音表现上体现出明显的力量感与运动感。分析发现其较多的力量感来自 80-200 的频段，在此频段声压级较高，在加速和减速等不同工况下表现出较强的跟随性，体现了年轻运动的产品定位。

这类设计强调的是对燃油性能汽车的忠实情感依托，对传统机械感的追求和模仿。电动汽车在动力上虽然与传统内燃机完全不同，但是设计师试图通过对物理声音的模拟来构建由燃油时代定义的性能爆发，用声音体现符合大众心理预期的动力感。声音与油门深度高度绑定，响应速度极快，能快速地回应每一次深踩踏板所带来的加速感。其目标用户多是追求性能的驾驶爱好者，这部分的用户将驾驶作为体验生活的一部分，喜欢每一个驾驶行为输入都有相应的声音反馈输出。

4.极简实用型

特斯拉、比亚迪等品牌与宝马用丰富谐波和电子合成音色构建的复杂声响效果不同，其推崇的是极简实用的音色审美风格，没有过多的频率成分，也没有丰富的谐波结构，音色构成比较单纯，声音整体风格类似于电机在运行时的基础声音。这种音色设计体现的是简单实用的风格，不用刻意追求附加的美学和情感价值，更加看重 AVAS 作为提示性声音的警示功能，简洁直接的设计风格与其目标用户理性实用的消费理念相吻合，这部分的用户更关注产品的性价比与实用价值，对附加的情感价值则相对淡漠。

上述四种 AVAS 设计风格不一，针对不同的消费群体设计了不同的声音审美取向，可见目前车企为体现各自品牌特性所做的差异化定位，已经开始注意到品牌形象与听觉体验的关联。这种趋势说明纯电汽车正在向更加个性化、智能化的方向进步，为本研究后续的个性化声音设计提供了丰富的原始素材与灵感。

（四）频谱对比分析

为了更好地对不同风格的 AVAS 声音设计的特性进行分析，不仅要从主观感受上去评价不同品牌和车型的听感特征，更需要从频域和时域图中观察该设计的产生特定的听感特征的原因，分析某些特定的听感特征（如能量感、稳定感、科技感等）与哪些频段有关系，该频段的声能量分布，以及一些频谱曲线的起伏等。

由奔驰 EQS 的 AVAS 频域图与光谱图可知，其在 200-1000Hz 的中低频段具有较高的声压级，在 20-200Hz 的低频区间声压级能量相对平缓，而在 2000-20kHz 的高频区间中声压级变化较快，从较高声压级快速降低至较低声压级水平。从图中可知像奔驰这样的豪华品牌在设计 AVAS 低速提示音时更加偏向于中低频的厚重感与丰富度，该频段的设计塑造了一种沉着稳定的独特声音气质，符合其设定的目标用户的审美取向，也符合该车的整体产品定位。



图 1.2 奔驰 EQS 的 AVAS 频域图

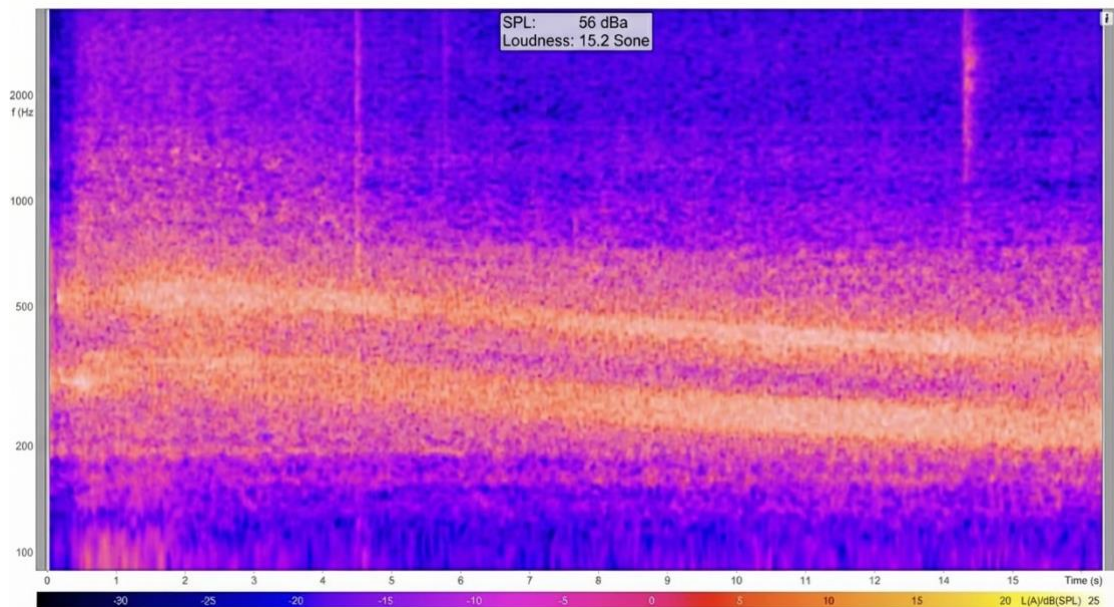


图 1.3 奔驰 EQS 的 AVAS 光谱图

同样作为豪华品牌，宝马 iX 的 AVAS 设计就与奔驰 EQS 的听感风格截然不同，由宝马 iX 的频谱图可知，在 100-200Hz 的低频区域相比于奔驰 EQS 来说会有一个较高的峰值，更加突出了该车低频的氛围感，SOLO 该频段发现此频段主要以低频的嗡嗡的轰鸣声为主，提供了最基本的能量感。在 1000-2000Hz 区间，声压级变化率较快，呈现出较为复杂的波形曲线变化，该频段主要是由奇次谐波频段组成，在听感上构成了偏向科幻的音响效果，相比于奔驰的声音设计，宝马 iX 在该频段的声能量具有明显的突出，这是形成更加丰富与变化的主要原因。在 2000Hz 以上的高频成分中，宝马 iX 的声压级快速下降，整体的高频成分并没有中低频多，所以形成科幻风格的听感，声量能主要还是集中在中频区间，同时低频也要更多的下潜提供较强的能量感。

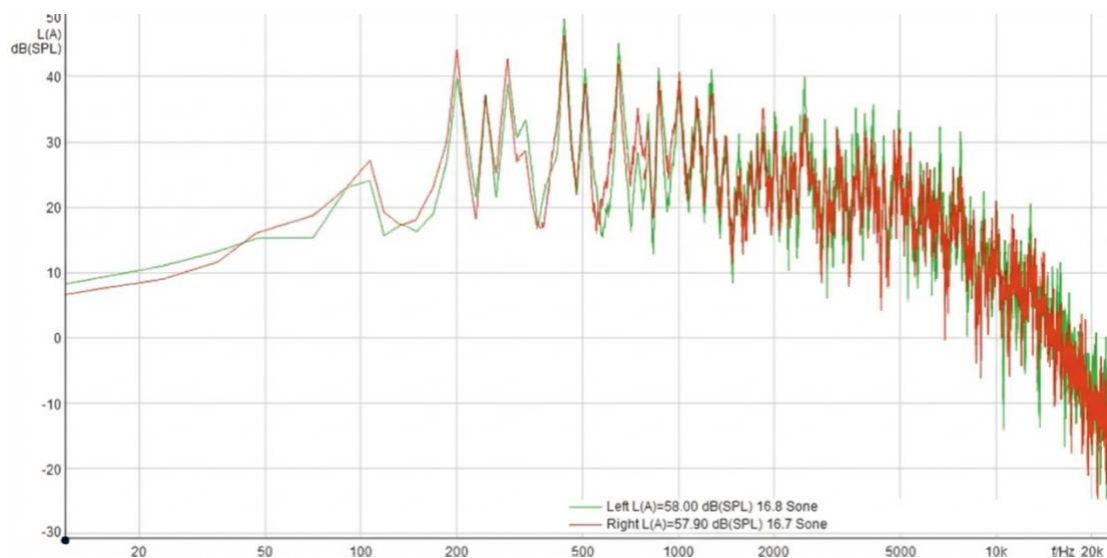


图 1.4 宝马 iX 的 AVAS 频域图

下图为小米 SU7 的 AVAS 频谱图，从图中可见其在 500-1000Hz 之间具有多个峰值，主要能量也集中在该区间中，在 200-500Hz 的中低频中频率变化较为平缓，而在 100Hz 左右有一个较为明显的小波峰，50Hz 以下的频段则相对平缓。小米 SU7 听感中的运动元素是由多个频段共同构成，最主要集中在 500-1000Hz 之间，该频段区间主要以嘶嘶声为主，混合中低频的嗡嗡的推动感，一起构建了年轻运动的听感风格。



图 1.5 小米 SU7 的 AVAS 频域图

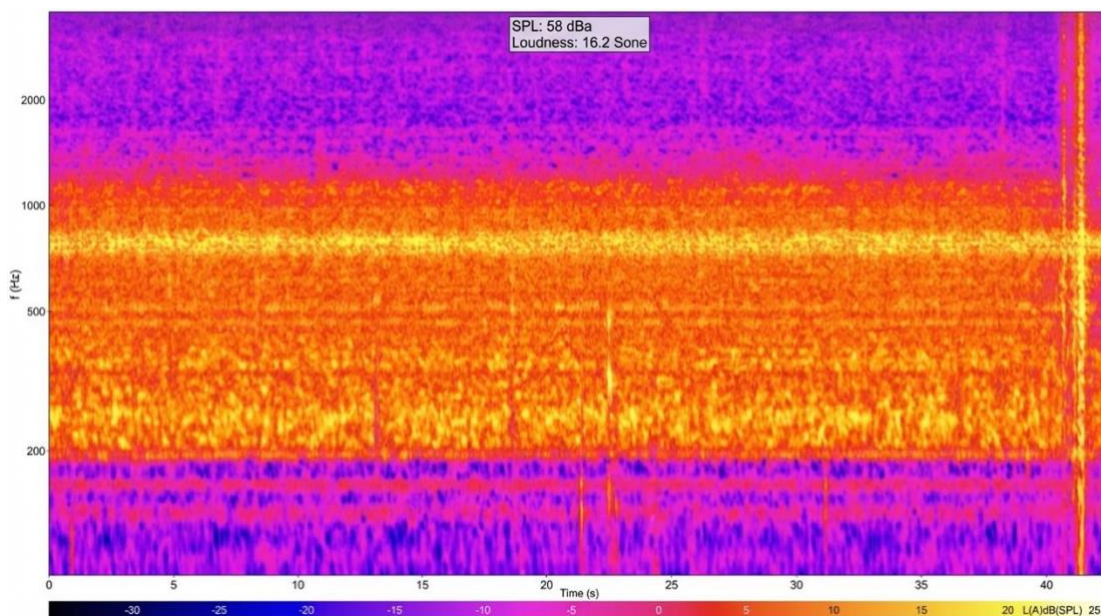


图 1.6 小米 SU7 的 AVAS 光谱图

从对不同品牌不同风格的 AVAS 频谱分析中可以发现一些值得关注的差异化信息，首先豪华品牌普遍比较注重低于 500Hz 的低频区域，偏好更为低沉的稳重感与厚重感，而新势力品牌在频段上更倾向于宽频覆盖，着重塑造音色的丰富度与科技感。另外在 300-500Hz 之间性能车型的能量明显更为强劲，而在 100-200Hz 之间会更为集中的则是强调舒适性的车型，所有车型共同的特点是都会避开 3000Hz 以上的高频，防止刺耳感的产生。

二、主动声浪模拟的设计与区别

除了强制性安全警报的 AVAS 系统，目前许多电动汽车还配备了“主动声浪模拟”的主动发声系统（Active Sound Design, ASD），区别于传统燃油车的车内声音，纯电汽车的这种舱内声音是通过多层声音合成与采样阶次变化等多种手段等实现了模拟燃油机声浪的模拟，这个功能主要是面向一些追求驾驶反馈的用户群体。本研究对选定样本车型的“主动声浪模拟”功能进行市场调研，分析其可调性、发声来源、实现方式、触发逻辑等多个维度的参数信息。

（一）功能分类与实现方式

根据样本车型的调研结果，按功能分类与实现方式等分类，整理为表 1.3。

品牌车型	功能名称	可调节性	声音来源	实现方式	触发逻辑
奔驰 EQS	Silver Waves/Vivid Flux	可选 3 种音效	车内扬声器	实时合成+播放	油门深度+车速
宝马 IX	IconicSounds Electric	可开关+音量调节	全车扬声器	Wavetable 合成	踏板位置+加速度
奥迪 E-TRON GT	e-tron Sport Sound	3 级可调	座舱扬声器	电机参数映射	驾驶模式联动
保时捷 TAYCAN	Electric Sport Sound	可开关	前后扬声器	物理建模	扭矩+转速模拟
特斯拉 MODEL 3	无独立功能	不可调	-	-	-
蔚来 ET5	NIO Soundscape	可选多种主题	车内 23 扬声器	场景化设计	情境感知
理想 L9	无独立功能	不可调	-	-	-
小鹏 G9	X-Sound 模拟声浪	可开关	Xopera 音响	预录制音效	加速触发

续表 1.3

品牌车型	功能名称	可调节性	声音来源	实现方式	触发逻辑
问界 M7	无独立功能	不可调	-	-	-
小米 SU7	声浪模拟	3 挡可调	全车扬声器	实时合成	运动模式+ 加速度
比亚迪汉 EV	无独立功能	不可调	-	-	-
极氪 001	无独立功能	不可调	-	-	-

表 1.3 主动声浪模拟功能对比

（二）典型案例深度分析

通过调研结果，分析具有明显特征的典型案例，发现不同品牌在设计理念、技术实现、声音特征等方面都有不同的策略取向。

宝马 IconicSounds Electric 系统是与著名电影音乐作曲家 Hans Zimmer 深度合作的作品，可以看出宝马品牌对汽车声音所传达出的品牌形象的重视。在设计理念上，设计师把电影声音艺术的表现力首次与量产汽车相匹配，强调了一种未来科技的美学理念，声音会随着驾驶模式、加速、减速等加速工况及时变化，保留驾驶激情的同时还具有强烈的科幻气质。分析其动态和频响特征，可使用波表合成技术实现，首先需要将声音分层（基础层、加速层、减速层、制动层等），其次是采用合适的实时参数映射，车速在 0-200km/h 区间对应合适的音高变化；加速度的变化可以与音量关联，最后驾驶模式需要对应不同的音色切换。在声音特征上，启动音为 2 秒逐渐增强的像“电池充能”般的合成音效，加速音是类似电流推进器的低频能量音，而巡航时是平稳的“嗡鸣”背景音，减速时则使用下降音调加能量回收的提示音。

奔驰 EQS 的 Mercedes-EQ Sound Experience 系统则体现了不同的设计理念，相比于科技未来感，奔驰更强调豪华感与放松感。该系统提供了 Silver Waves 与 Vivid Flux 两种音效主题，前者听感柔和，像流动的河水；后者声音比较动感，像能量聚集的电流。分析这两种音效主题的声音特征发现，Silver Waves 音高集中在 200-600Hz，音色可以由弦乐合成器加环境音构成；而 Vivid Flux 音高跨度更大，音色可以由合成器加电子鼓点构成，表现出活力现代的情感倾向。此类音色可以通过预录制加实时处理，然后需要

与 Burmester 3D 环绕音响系统深度集成，还需要配合空间音频技术让声音从前到后流动得以实现。奔驰还有其独特的设计，模拟声浪并不是独立的功能，它还与氛围灯联动实现声光同步，还能与座椅按摩联动实现多感官体验，也可选择无声模式实现完全静音，用户可根据需求自由开启不同的联动模式或者选择无声。

对比分析可知，宝马和奔驰等豪华品牌更加看重情感化和多感官的豪华体验，强调的是氛围而非性能；保时捷等性能品牌坚持运动基因，提倡声音也是驾驶体验的一部分；蔚来、理想等新势力品牌提出声音可订阅和共创的创新商业模式；小米等科技品牌更加注重可选择性，给用户相对较多的音色可选；特斯拉等品牌认为声音要以实现功能性为主，目前对提升驾驶体验的主动发声系统并没有相关内容可选。

第二节 用户需求与偏好调研

为了验证前文所述的现有纯电汽车的主动声音设计是否满足用户需求，以及了解用户对个性化声音设计的期待，除了需要对已有车型进行市场调研外，还需要明确用户的需求。不同的类型的用户对于纯电汽车的个性化设计的敏感程度和认知水平是不一样的，所以本研究需开展系统的用户调研，分别对 AVAS 音效与声浪模拟进行偏好分析，并对调研结果进行系统性的分析，从调研的结果分析现有设计的优点与缺点，在优缺点中寻找改进的方向。

一、调查对象选择与问卷设计

在开始设计调查问卷之前需要先明确调查目标，本次的调查目标首先是了解用户对现有 AVAS 音效的评价，其次是探索用户对主动声浪模拟的态度与偏好。针对以上两类调查结果，进而识别不同用户群体的需求差异，为个性化的声音设计提供数据支持。

在调查对象的选择上，首先需要足够的样本量，预期的有效样本量为 100 人左右，该样本量的选择适中，进行的难度也不会太大，同时兼具了一定的数据检测能力，具有一定的可行度。除了样本量的预期外，对调查对象也需要设定一定的纳入标准，才能符合客观的用户需求的真实情况，年龄段需要在 18-60 岁之间，持有驾照者优先，了解或者接触过纯电汽车，包含试驾、搭乘、拥有等可以优先考虑，同时完成问卷的时间需要大于 5 分钟以排除敷衍填写的情况。调查问卷的招募渠道可以向蔚来 APP、理想 APP、

特斯拉、小米社区等新能源汽车车主的社群里招募，在汽车厂商官方 APP 的社群中活跃着大量本品牌的真实车主，这些车主对于车辆的声音设计会比普通用户更为了解，可以搜集到大量关于该方面的有用调查信息。其次是可以在一些汽车的垂直论坛搜集调查对象，比如汽车之家、懂车帝、爱卡汽车等等，在这类汽车类论坛中聚集了许多对技术感兴趣和对新能源汽车有使用经验的用户，且该论坛的活跃用户对汽车的关注度也比较高，填写问卷的意愿也相对强烈，特别关注论坛中有发布关于汽车声音相关话题的帖子，可以在该帖子下面跟帖发布问卷填写地址，针对性地选择高质量的调查对象，高效地提升调查结果的准确性。最后可以选择在小红书、微信朋友圈、微博等社交媒体上发布问卷地址，关联汽车声音相关的话题标签以提高曝光度。除了线上的招募模式之外，还可以拜访线下的 4S 门店，与不同车型的销售取得联系，让门店的用户成为优质的被调对象。问卷的制作工具可以选用问卷星、金数据等在线制作并生成问卷链接，再由以上的招募渠道在线发放，发放的过程中需要针对不同的平台特征，差异性选择发帖文案，适合该平台特征的文案能有效地提高填写问卷的意愿性。

在设计调查问卷时，还需要考虑样本的结构，样本结构设计应该符合纯电汽车潜在的用户比例，在性别上男性占比 60%，女性 40%；年龄段上 18-25 岁占 15%，26-35 岁是纯电汽车的主要消费群体，该年龄段在样本结构中占据 40% 的占比，36-45 岁和 46-60 岁的中年及中老年群体设计占比分别是 30% 和 15%；电车的使用经验中，已拥有电车的占比需要超过 30%，试驾过电车的在 40% 的区间比较合理，而仅搭乘过和近了解过的样本结构占比不要超过 30%；在购车预算的设计上，需要尽量包含各个价位段，不能过于集中于某一购车预算区间，否则样本的结构可能会失衡，导致调查结果并不符合真实情况，20 万以下预算的样本量需要控制在 20% 以上，而 20-30 万左右的预算群体占据纯电汽车的主要预算区间，该区间的样本量占比需要占比在 35% 以上，30-50 万预算占比可以相对减少，而 50 万以上的高端电车占比控制在 15% 左右则比较合理。通过合理的样本结构的规划，可以避免由于样本结构的不平衡所导致的结果偏差，也可以有效提高数据的信度，增强问卷的真实性。

问卷采用线上和线下结合的方式，以选择题为主，可按照问题的提问方式选择多选或单选。问卷一共包含四个部分，第一部分为基本信息题，涉及性别、年龄、职业、驾龄、与纯电汽车的关系、拥有或试驾过的电车、购车预算区间等问题，该部分是为了了解调查对象的基本信息，与另外的部分做交叉分析，对比不同性别、年龄等基本信息与

AVAS 音效和主动声浪模拟的关系；第二部分为 AVAS 音效认知与评价题，包含 AVAS 基本认知、功能性认知、差异性、样本音效喜好、风格偏向、音量设置、驾驶场景等问题，这部分是调查用户对 AVAS 音效的了解与认知程度和偏好；第三部分为主动声浪模拟偏好题，该部分主要调查用户对电车提供的“主动声浪模拟”功能的了解与偏好，包含对“主动声浪模拟”功能的总体态度、使用场景、使用频率、音色喜好度、调节维度、付费意愿等问题，“主动声浪模拟”作为非强制性的声音设计需求，问卷设计需要考虑用户的接受度，更关注用户的偏好与使用意愿；第四部分为个性化需求与未来期待题，包含个性化声音的体现、汽车声音喜好度的影响因素、情感特质的传达、功能性需求、未来期待、个人建议等，部分题可以设计为开放题（文字描述），该部分可充分收取用户的期待与建议，对于实现个性化的声音设计具有重要的参考意义。问卷的总体设计需要从用户的视角出发，避免使用过于专业的提问方式，从用户的直观感受出发，与体验紧密相关的调查提问更能搜集到用户真正关注的问题，问卷共 35 题，预计完成时间 8-12 分钟。

二、 AVAS 音效反馈与偏好

问卷中有关 AVAS 音效的反馈的调研实施的持续时间为三个自然周，搜集的有效问卷量为 96 份，回收样本量为 102 份，剔除 6 份无效数据（完成问卷时间小于 5 分钟、调查答卷前后矛盾等）之后，综合完成率为 94.2%，平均完成时间为 9 分 17 秒。答案来源 73%来自微信，14%来自线下问卷，其余的 13%来自流媒体和其他渠道，问卷回答的时间段主要集中在 2025 年 9 月到 10 月初，地理位置 82.61%来源于重庆，8.7%来源于北京，其余来源于江苏、陕西等城市。

从样本的基本信息（Q1-7）中可以分析样本的人口统计学特征，对比男性 56.2%和女性 43.7%的比例，男性的比例略高于女性。年龄段分布数据显示 18-25 岁和 26-35 岁年龄段合计占据总体的 78%以上，是本次调查的主要年龄群体，36-45 岁和 46-60 岁年龄段分别占据 4.1%和 17.7%，样本数据表明本次调查研究主要针对年轻群体，而中老年群体样本量偏少。受访者中企业职员是最主要的职业群体，占比接近 34.7%，其次是自由职业者和学生，分别占比 26.1%和 21.7%，三者合计超过 80%；其中公务员/事业单位占比较低仅 8.7%，退休和其他职业则为 4.3%，这表明职业分布样本中企业相关职员和学生占比较高，而其他职业占比较低代表性不足。通过对比不同驾龄的比例发现 3-5

年驾龄占比达到 34.7%，其次是占比接近 26.1%的 5-10 年驾龄段，两者合计占比超过 60%，表明驾龄 3 年以上和 10 年以下的中等驾龄阶段占据了主导地位；相比之下 1-3 年驾龄只有 8.7%，10 年以上高经验驾龄最低仅为 4.3%，而无驾照和一年以下低阶驾龄段占据了 13.4%，这反映出受访群体中低阶驾龄和高经验驾龄者占比偏少，可能影响调查结果的全面性。从电动汽车经验数据来看，有少量仅了解过电动汽车的数据占比 3.1%，多数受访者都多少对电动汽车有使用或者搭乘经验，已拥有和试驾过的占比分别为 30.2%和 26.1%，说明过半的受访者都有驾驶过电动汽车的经历。从已拥有电动车中各个品牌的数据来看，特斯拉、小鹏、问界和比亚迪的比例都接近 20%，其次是理想占比 17.39%，蔚来、小米和其他品牌各占比 13.4%，数据表明新兴品牌的影响力正在逐渐增大并超越传统车企成为现在的主流电动车型。同时从购车预算中可知，15-20 万预算区间比例最高，占比达到 43.5%，20 万以下预算区间的占比超过 50%，20-30 万中等预算占比 21.9%，而 30-50 万和 50 万以上占比仅有 19.8%和 6.2%，可见多数受访者的购车预算集中在 20 万以下，而 30 万以上预算的高端车型占据数据中的少数。

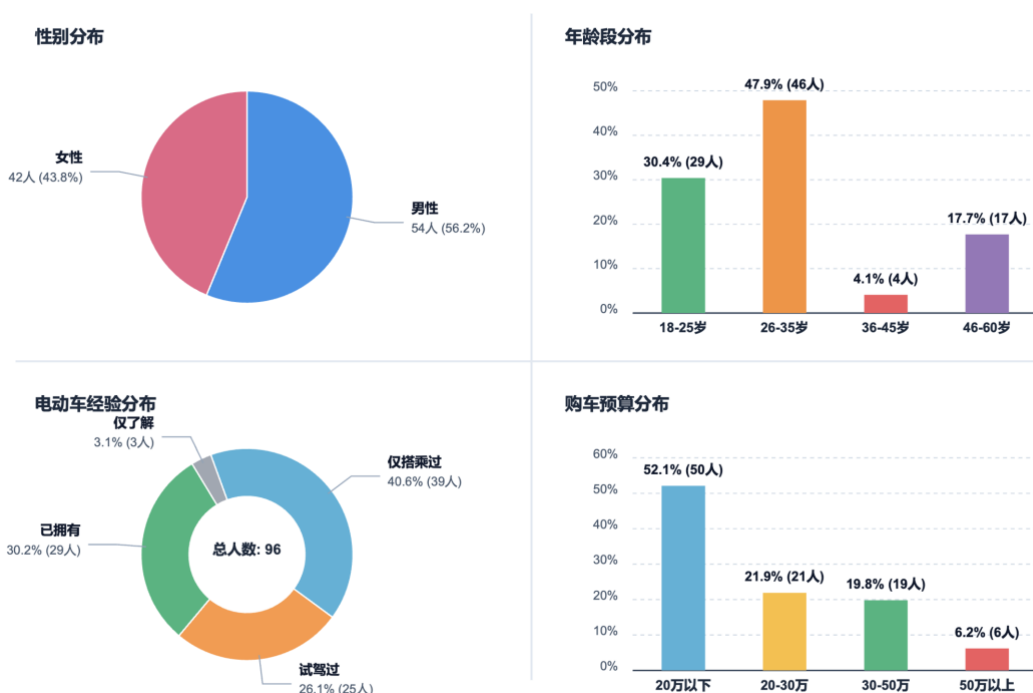


图 1.7 Q1-7: 样本的基本信息

从 Q8（您是否知道纯电动汽车配备 AVAS？）调查数据显示，听说但不清楚具体是什么的比例占比（43.48%）最高，其次是对纯电汽车配备的 AVAS 音效系统非常了解并

清楚地知道具体作用和功能的占比达到 26.09%，可见大多数用户对纯电汽车的 AVAS 音效是有一定的了解的，对此功能有深刻感知的用户也不在少数。但完全不知道该功能选项的占比占据 30.43% 之多，说明汽车 AVAS 音效的用户认知并不是很普遍，有接近七成的用户只是了解过或完全不了解，知道且关注过不同车型差异的用户在本次调查中更是没有占比（0%）。从以上数据可知大多数用户对于该系统的功能缺乏认知，对不同车型 AVAS 的差异更是知之甚少，由此推断目前极少部分人会去关注 AVAS 音效对汽车品牌的形象塑造，用户可能比较关心更加直观的声音反馈（如有部分用户反馈曾个性化定制过锁门音效），对 AVAS 音效的关注度并不高，增加 AVAS 音效的认知度还需要汽车产业和新能源车企的努力，可见个性化的 AVAS 音效具有很强的推广和研究价值。

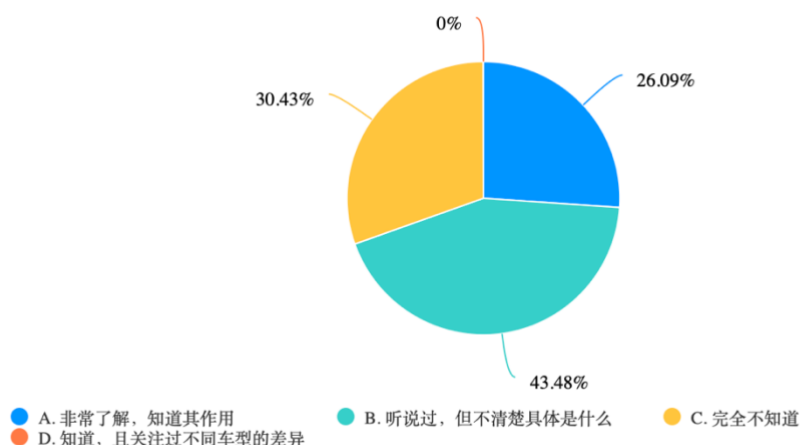


图 1.8 Q8: AVAS 认知度饼状图

用户对 AVAS 音效的功能重要性了解可以从 Q9（您认为 AVAS 最重要的功能是？）中分析，提醒行人/非机动车注意安全的选项占比 56.52%，远高于其他选项，可见一半以上的用户都认为 AVAS 音效是考虑安全性的必要设计，对 AVAS 音效的基础的警示功能有基本了解，也凸显了用户对安全功能的强烈偏好。相比之下，体现品牌/车型特色的选项占比 4.35%，在所有选项中占比最小，所以体现品牌特性的个性化的 AVAS 音效在普通用户中的认知了解程度并不高，而不同车型的视觉元素在用户对体现各自品牌特征的认知程度明显高于听觉元素，用户对汽车主动声音设计的了解还停留在表面的基础功能阶段，而体现产品特性的个性化需求并没有得到较多的共识。其他选项如确认车辆已启动、提升驾驶仪式感、满足法规要求即可各占 13.04%，对用户来说优先级大大小于提示安全功能，这表明安全是目前大多数人的核心需求，而对个性化的声效需求还有待提

高

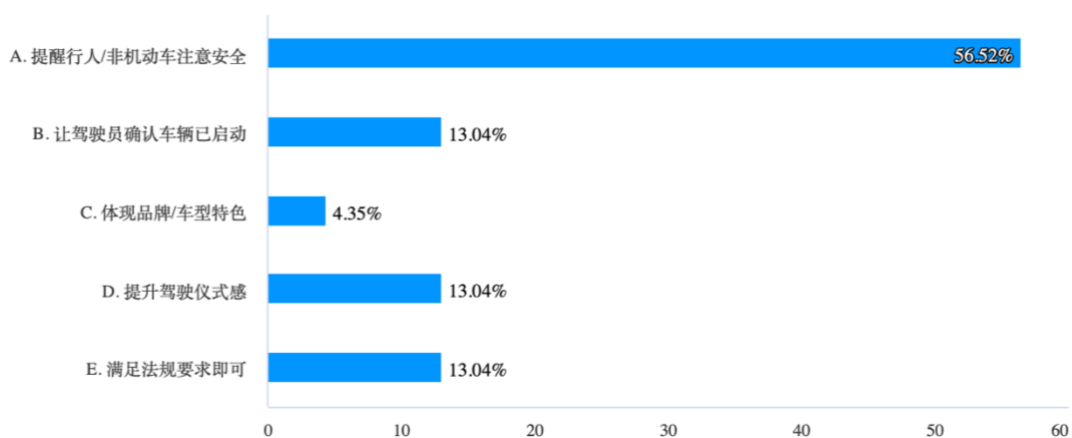


图 1.9 Q9: AVAS 功能性认知

在 Q10(您是否注意到不同品牌电动车的 AVAS 音效有差异?)中可以看到, 65.22% 的受访者表示对不同车型的 AVAS 音效感知有差异但说不清楚具体的区别, 还有 21.74% 的受访者表示从未留意过此差别, 仅有 13.04% 的受访者表示不同品牌车型的 AVAS 音效有较大区别且能够明显地分辨出品牌。从以上数据分析可知, 目前现有的 AVAS 设计同质化严重, 品牌辨识度较低, 很少有用户能够通过 AVAS 清晰地分辨不同品牌的车型, 大多数用户对此的了解仅仅停留在知道但分辨不出区别的程度, 甚至是从未留意过该功能, 所以个性化的 AVAS 需要突出品牌化的声音, 增强不同品牌车型的辨识度, 通过声音去提高品牌辨识度。

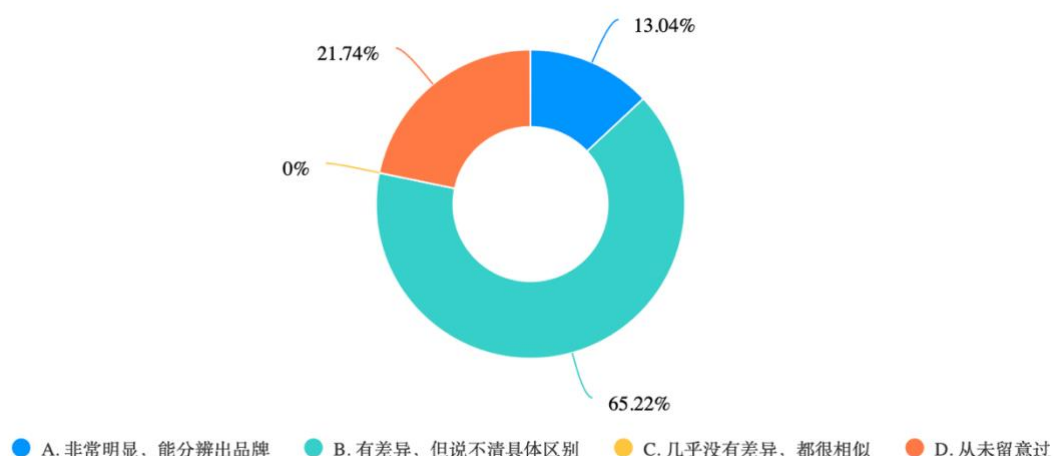


图 1.10 Q10: AVAS 音效差异性

为了探究用户对不同 AVAS 音效风格的偏好, 问卷的 Q11 (不同风格 AVAS 音效样

本评价)和 Q12(不同风格偏好多选题)分别对不同风格的 AVAS 音效进行采样,按照风格分类进行评分制,并让受访者选择自己最偏好的 AVAS 风格,并对数据进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)验证不同风格音效样本在用户中是否存在明显差异。从统计数据中发现,样本 B 的“科幻未来型”音效平均分($M = 4.15$, $SD = 0.87$)最高,并且有 41.6%的用户将其打了最高分,表明如宝马 iX 这类以科技为产品特点的车型搭载适配的 AVAS 音效在受访者中最受欢迎;其次分别是“豪华优雅型”(样本 A, $M = 3.82$, 28.4%)与“运动激进型”(样本 C, $M = 3.56$, 19.8%),而简约实用型“简约实用型”(样本 D)得分最低($M = 3.21$, $SD = 1.03$),只有 10.3%的用户对此风格偏好较高;四种音效风格中“运动激进型”标准差($SD = 1.12$)最大,可见用户对此风格的偏好两极分化的现象较为严重。

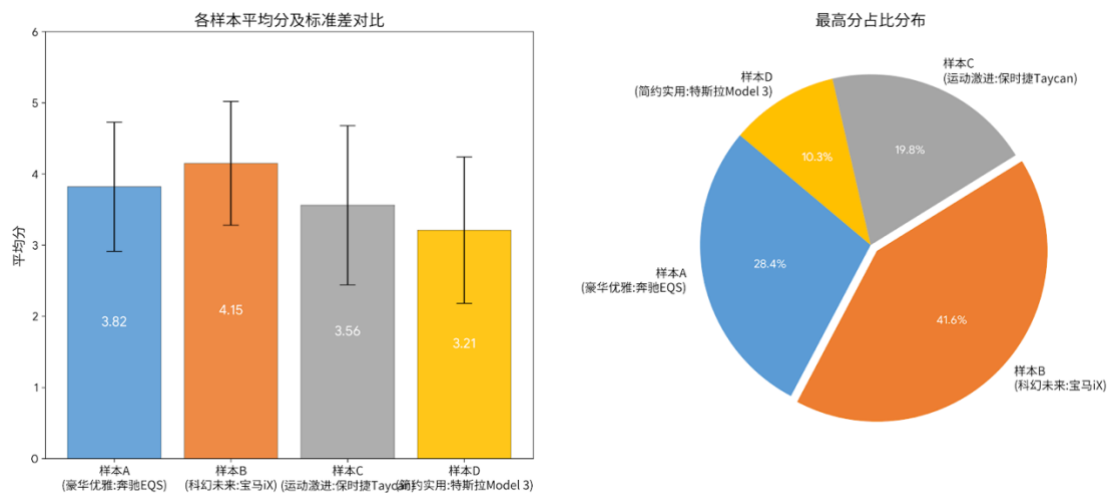


图 1.11 Q11-12: AVAS 音效风格的偏好

除了样本试听评估之外,本次调查问卷还对不同风格偏好设置了多选题,数据显示柔和温暖柔和的风格占比 43.48%在用户中最受欢迎,其次是音乐旋律化风格占据了 34.78%,自然环境音和明亮清脆各占 30.4%,而科幻电子、机械感等风格占比较少,有 8.7%的用户认为还是越干净越好。以上数据说明目前阶段用户对柔和感、自然感的 AVAS 音效接受度较高,而对科技感、机械感的接受度则较低,少部分用户认为现在纯电汽车配备 AVAS 音效会影响驾驶舒适,偏好绝对安静的座舱环境。

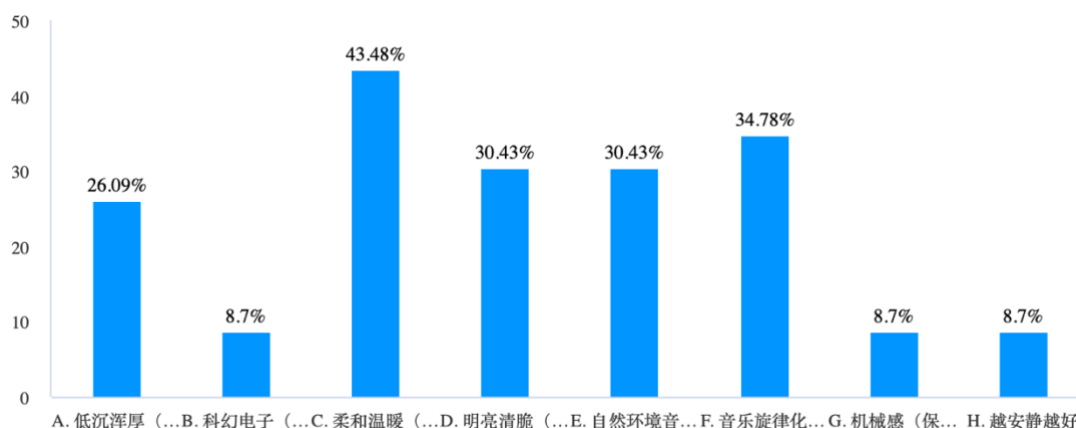


图 1.12 AVAS 风格占比柱状图

为了验证人口统计学特征对音效偏好的影响，在上述音效风格偏好总体比例上还可以与受访者的性别、年龄等基本信息做交叉分析，可进一步了解到不同性别和年龄对不同风格的 AVAS 音效的偏好度。数据显示不同年龄段的用户在音效审美上具有很大的差距，18-35 岁的年龄段对音乐旋律化的、柔和温暖的风格具有强烈的偏好度，其中 18-25 岁的男性用户对音乐旋律化的风格偏好达到了惊人的 100%，而 46-60 以上的男性年龄段则相反，46-60 岁的男性用户更加喜好低沉浑厚的风格，60 岁以上的男女用户都认为汽车越安静越好。36-45 岁年龄段的男性偏好比较广泛，对柔和温暖、明亮清脆、科幻电子都具有较高的偏好度，26-35 岁年龄段的男性用户风格化较为平均，该段在各个风格皆有一定占比。对于女性用户来说，可见的是女性用户对多样风格的偏好更为强烈，但相比于男性用户，女性用户对机械感、科幻电子风格的偏好度明显低于男性，18-25 岁的女性中有 75% 选择最喜欢的风格是柔和温暖，其次是越安静越好；而 26-35 岁的女性则认为明亮清脆的音色更为好听（占比为 60%），该年龄段的女性同样也偏好音乐旋律化的声音。由此，纯电汽车的 AVAS 设计需要考虑到性别与年龄对音色审美的影响，柔和温暖、音乐旋律化、科幻电子类音效风格在当今市场上符合大部分用户对纯电汽车 AVAS 的审美取向，同时由于性别和年龄的区别所产生的偏好差距，为未来推出可自定义、可编辑的个性化 AVAS 音效提供了强有力的现实依据。

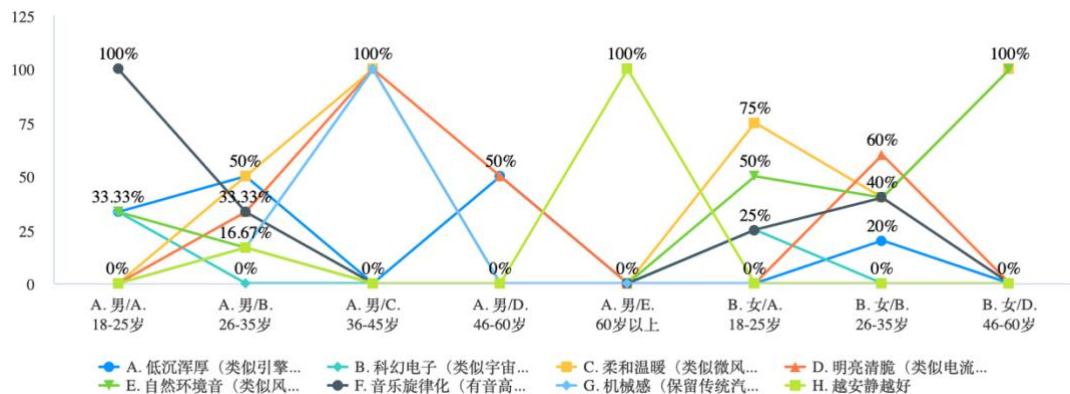


图 1.13 AVAS 音效风格偏好交叉分析

问卷中的 Q14-17 询问了用户关于 AVAS 设计诉求、现实情况、满意度评价、改进方向等情况, 53.17%的用户认为应该可以根据驾驶模式自由切换, 认同应该成为品牌识别的标志的用户占比 39.13%, 有 47.83%的用户喜欢在多种风格中选择自己更为偏好的选项, 觉得应该与车型定位匹配与能随着季节和心情更换的选项分别占 34.78%和 26.09%, 而觉得不应该有太多花样、统一简单就好的选项占比最少, 仅为 4.35%。以上数据占比表明目前用户对能够自由切换的智能化 AVAS 需求最为强烈, 多种可选风格的个性化需求也在增加, 根据车型匹配的差异化需求也不在少数, 而简单统一的风格已经很难满足日益丰富的纯电汽车市场。在用户的日常情况中也发现了许多现实问题, 30.43%的用户表示曾在安静环境下被电动车吓了一跳, 原因是没有听到汽车的声音; 觉得某款电动汽车的 AVAS 音效很刺耳且不舒服的用户占比有 26.09%, 甚至有 17.39%的用户表示存在因为 AVAS 太吵而被周围人抱怨的情况, 仅有 21.74%的用户觉得现在的 AVAS 音效很酷且增加了科技感。由于存在感与警示性不足所产生的安全问题、声音设计刺耳不耐听的设计质量问题等, 所以就现在的 AVAS 音效来说还有许多的现实问题亟待解决。在对现有的电动汽车 AVAS 满意度评价调查中发现, 表示非常满意的用户只占了 13.04%, 满意的用户占比为 39.13%, 而有 26.09%的用户对该功能感觉一般, 不满意和未接触过无法评价的用户占了 4.35%和 17.39%。为了验证职业类别与现有 AVAS 满意度是否存在关联, 交叉分析后发现已退休的用户对该功能都打了 9-10 分 (非常满意), 企业职员有 50%表示比较满意, 自由职业者对该功能满意度褒贬不一, 满意、一般、和非常满意各占比 33.3%; 学生 40%表示比较满意, 20%没接触过, 还有 20%觉得一般; 公务员 50%都表示没有接触过。可见已退休的用户对该功能最满意, 其他职业类型对现有的设计表

示还有许多方面需要提升。在 Q17（AVAS 设计最需要改进的方向）中 47.83%的用户希望 AVAS 设计可识别度更高、更具有品牌特色；其次是希望音色更悦耳，且在加速、减速等不同工况中能与车辆动态更匹配；希望能够考虑城市、高速、小区等不同场景需求的用户占比 17.39%，也有 21.74%的用户对更合理的音量、更丰富的音色变化提出了要求；此次调查中没有用户觉得目前的车型 AVAS 设计已经很好无需改进，可见用户对更丰富的个性化 AVAS 设计具有较高的需求，现在车型的设计还存在许多需要改进的方面，设计 AVAS 除了需要遵循最基本的法规要求外还需要考虑很多现实情况。

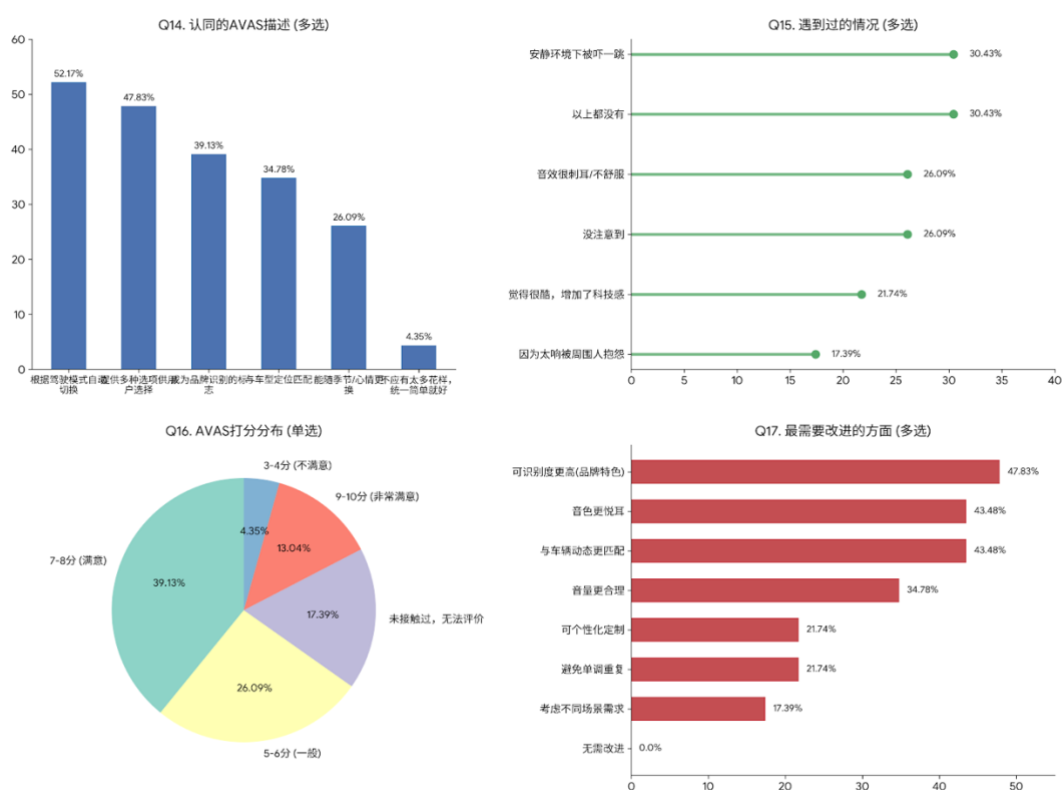


图 1.14 Q14-17: AVAS 音效设计诉求

三、主动声浪模拟的反馈与偏好

调查问卷中关于“主动声浪模拟”功能的部分可以从功能认知度、总体态度、使用习惯、声音类型偏好、场景需求度等多个方面进行问题设计，从多个方面评估当前用户对主动声浪模拟技术的潜在需求与主观反馈。此部分的平均完成时间在 7 分 35 秒，去除小于 3 分钟完成的样本，最后收集到 96 份有效样本数，在前文(Q1-7)的基本信息中已经分析了人口统计学特征，此处共享数据分析结果方便与之后的多个方面进行交叉分

析。

Q18（是否知道“主动声浪模拟”功能？）中可以分析用户对该功能的认知度，调查结果显示主动声浪模拟功能在受访者中的认知度整体偏低，有高达 34.78%的用户完全不知道有该功能，知道且体验过的仅占 34.78%，而知道且经常使用的用户在本次调查中没有数据占比（0%），只是知道但是没有体验过的也有大量占比（30.48%）。上述数据表明当前的主动声浪模拟功能在用户中的认知度明显不足，相较于视觉 HUD、辅助驾驶等其他功能来说，该功能在市场上的渗透率严重低于其他交互功能，深度使用的用户更是少之又少，没有体验过的用户占比合计高达 65.26%。数据结果反映出现在车企对主动声浪模拟的功能宣传力度和用户引导还有明显的短板，目前市面上搭载该功能的车型也偏少，主要集中在中高端车型中，且只有年轻运动型车型（如小米 SU7）在发布会上有单独演讲过该功能，其他车型则更强调视觉、智能化、舒适性、动力续航等配置，对声音交互反馈的宣传力度远低于其他功能。

用户对模拟声浪的总体态度可以从 Q19（对“主动声浪模拟”的态度）中得见，调查结果显示大多数的用户对模拟声浪的都持正向态度。非常喜欢“主动模拟声浪”并且觉得是必要功能的用户占比 21.74%；表示比较喜欢模拟声浪，认为其增加了驾驶乐趣的用户占比 34.78%；39.13%的用户持中立态度，认为该功能没有没无所谓，开不开启都行，仅有 4.35%的用户持负面态度，觉得模拟声浪有点假所以不太喜欢，但在本次调查中并没有受访者选择非常反感。从数据中所见，虽然目前大部分的用户对“主动模拟声浪”功能的认知度并不是很高，但有超过 50%的用户对其表示喜欢，所以该功能具有很好的市场前景。

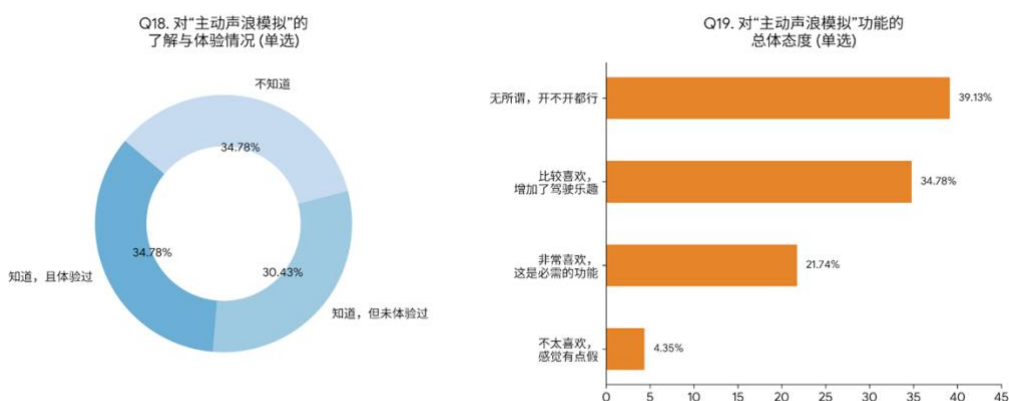


图 1.15 Q18-19 主动声浪模拟功能性认知

探究性别差异是否影响对“主动模拟声浪”的态度时需要做交叉分析，从分析结果中可以看到男性受访者中持正向态度的占比 61.54%，没有男性持负面态度；在女性受访者中也有 50%对“主动声浪模拟”表示喜欢，但有 10%不太喜欢该功能，经过卡方验证（ $\chi^2=13.47, p<0.01$ ）表明男性用户对主动声浪模拟功能的接受度与需求度均高于女性，该结论与上文中男性普遍更关注驾驶性能的分析结果相吻合，所以在功能实现与交互设计中需要考虑性别差异，车企厂商在营销传播中可以从性别上做垂直化宣传。

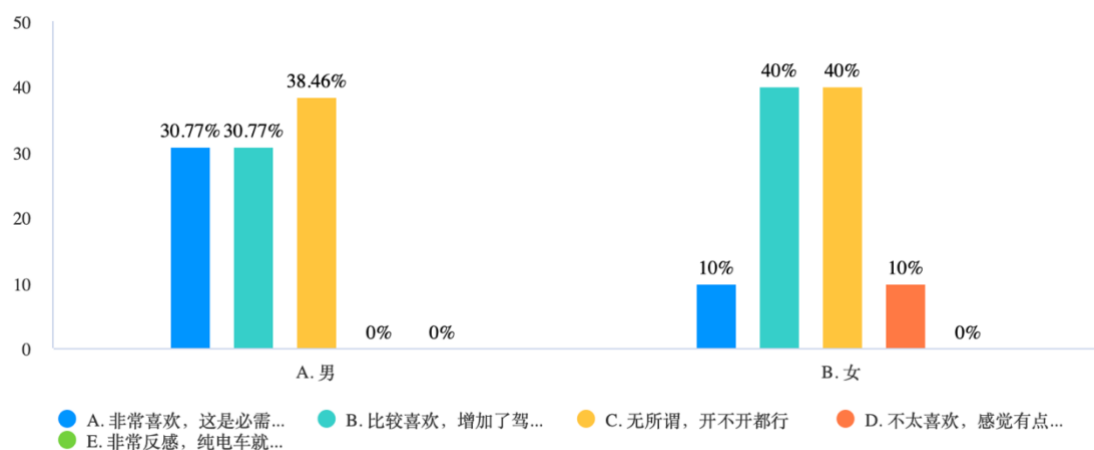


图 1.16 性别差异是否影响对“主动模拟声浪”的态度

从 Q20（如何使用模拟声浪？）中可以分析用户的使用行为，39.13%的用户只是偶尔开启该功能体验新鲜感，想一直开启的用户占 26.09%，还有 13.04%的用户在运动模式或激烈驾驶时开启，而从未使用过该功能的用户占比 21.74%。以上数据显示了“场景化使用”在用户中是最普遍的模式，一定程度地体现了部分用户对现有体验的不满，总体上来看，模拟声浪功能呈现出低频率使用、高场景依赖的特征，用户更倾向于在一定的场景中使用，而不是全程开启，所以未来的设计需要考虑与场景化的联动，而非单纯地设计声音简单地包含所有驾驶场景。

在期望的声音类型方面设计了 Q21（车内主动声浪应该模拟什么样的声音？）多选题，有 39.13%的用户认为应该模拟未来科幻飞行器的声音，认为需要模拟传统燃油跑车发动机声和电动机真实工作声的用户合计占比 69.56%，认为应该使用电子合成音乐的用户占 30.43%，觉得应该模拟自然环境声和用户自定义的用户占 52.18%，而有 17.39%的用户觉得不应该模拟任何声音，保持安静就好。数据整体比较平均，说明用户希望“主动声浪模拟”应该多样化，既要有对科技感的追求，也要有对传统燃油机的情怀。所以未来模拟声浪的设计中需要可自定义，或者提供较多的预设方案供用户选择，不可以单

一的方案覆盖所有用户的需求。

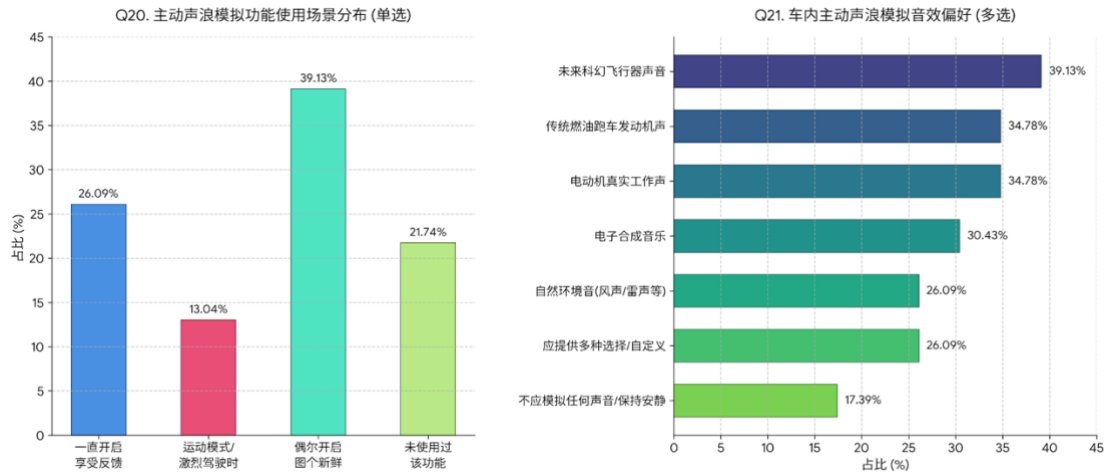


图 1.17 Q20-21: “主动模拟声浪”使用场景与偏好

为了探究具体场景“主动声浪模拟”功能的使用频率与必要性，Q22（不同场景主动声浪的必要性）设计了 5 个不同的驾驶场景，按照 5 分制对不同场景使用该功能的必要性进行打分，最后计算标准差对必要性从高到低排名。从不同驾驶场景的必要性排名来看，赛道驾驶场景的必要性排名最高 ($M=4.23$, $SD=0.91$)，山路驾驶场景次之 ($M=3.87$, $SD=0.98$)，高速巡航和城市通勤场景排名第三和第四，而夜间驾驶场景排名最低 ($M=2.34$, $SD=1.15$)。从使用驾驶场景必要性排名结果来看，用户对“主动声浪模拟”功能的需求与驾驶情景的激烈程度高度相关，在日常场景中的必要性远低于运动场景中。在调节维度的需求 Q23（希望主动声浪的调节维度有哪些？）中，用户的需求呈现出明显的层次性结构，希望可调节音色类型、音量大小、响应灵敏度等层级占比都超过 50%，希望可调节频率范围并可随驾驶模式自由切换的用户分别占比 34.78% 和 47.83%，而希望可以调节扬声器空间分布的高级功能的用户占比也在 21.74%，但有 8.7% 的用户希望该功能不需要那么复杂，简单开关就好。所以在设计该功能的可调程度时可以采用多级调节的模式，例如“基础+高级”的分层设计策略，以满足用户对不同层级调节的需求。

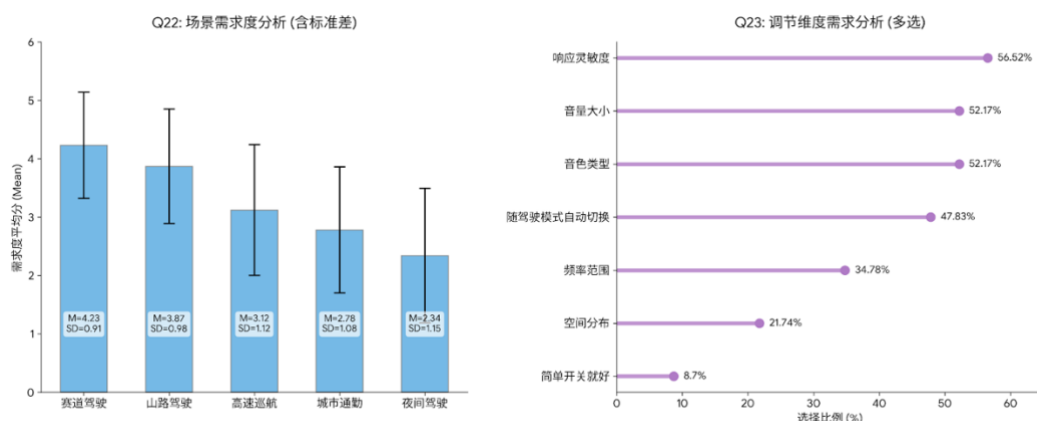


图 1.18 Q22: 不同场景主动声浪的必要性

除了 AVAS 音效样本测评试听之外, 同样地对主动模拟声浪也做了样本测听评分 Q24 (3 段声浪样本评价), 试听样本分别为模拟 V8 引擎声 (样本 A)、科幻电音 (样本 B)、纯净电机声 (样本 C), 评分维度为真实感、愉悦度、驾驶乐趣提升以及长期使用意愿四个维度。评分结果显示真实感与愉悦度之前存在着一定的相悖关系, 在样本 C 中真实感评分 4.1 分居于最高, 但是其愉悦度评分只有 3.4 分, 用户长期使用意愿只占比 29.6%, 这两个维度在三种样本中均为最低, 说明客观真实并不等同于主观好听; 尽管样本 B 真实感评分最低 (2.8 分), 但其在愉悦度 (4.1 分) 和长期使用意愿 (51.2%) 上位居榜首; 样本 A 虽然在驾驶乐趣提升维度评分最高 (3.9 分), 但是由于其真实感评分较低 (3.2 分), 所以用户的长期使用意愿只有 38.5%。多维度的评分数据表明, 在用户的感知中真实感的优先级要低于愉悦度, 科幻电子类的接受度与长期使用意愿较强。

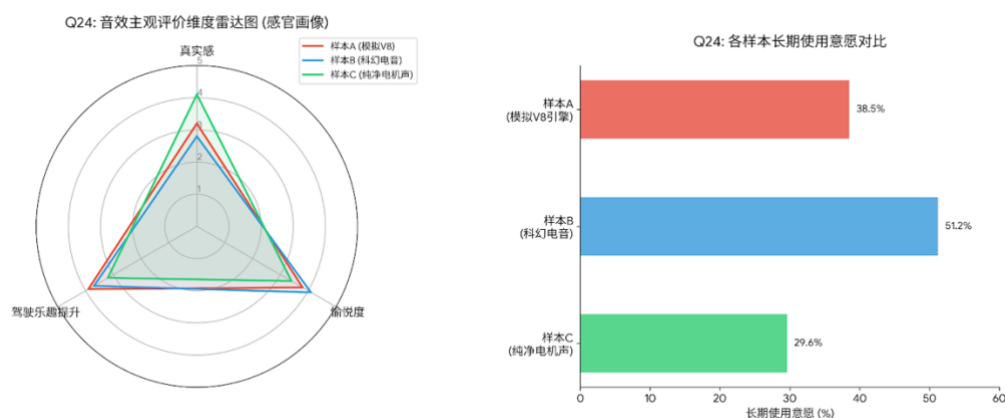


图 1.19 Q24: 3 段声浪样本评价

受访者对现有设计的某些问题在 Q25 中可见三个核心痛点，第一是与车辆实际动态不匹配所导致的声音加速感不同步，该选项占比 39.13%，第二是长时间听容易疲惫和烦躁，占比 39.13%，并列的是可选择性太少，不能满足个性化需求，第三是担心影响车内的其他乘客（占比 26.09）。这些痛点表明当前主动声浪的个性化程度以及声音的耐听度与质感有明显的提升空间，车辆实际动态不匹配的问题对声音引擎实时算法提出了更高的要求，而且不知道如何调节和觉得没有明显问题以及未使用过的也占据了一定的比例，说明现在的主动声浪功能的产品形态与用户心中的期待仍有一定差距。Q26（希望自定义声浪添加哪些元素？）中分析了个性化元素的期待，想要添加自己喜欢的音乐片段的比例达到 69.57%，说明了音乐性的元素在市场上具有较高的接受度；想要添加个性化录音的比例是 43.48%，用户对自定义调节一直具有较高的需求；其次是经典车型的声音和游戏音效各占比 34.78%，仅有 4.35%的用户表示不需要添加任何元素，反映出部分用户对经典声音的情怀以及跨媒体声音体验的期待。统计数据可见有高达 95.65%的用户对不同方面具有个性化的需求，与 Q21 中对用户自定义的强烈诉求高度吻合。最后对用户的付费意愿进行了调查，结果显示主动声浪模拟具有强劲的商业化潜力，愿意为个性化声音定制服务付费的用户占据 56.52%，接受价格定位在 500 元以内的用户占比 26.09%，愿意每月订阅付费的用户占比 8.7%，而其他更高的定价区间皆有一定占比，基于以上数据，有过半的用户都愿意为声浪模拟付费，定制化服务展示出了客观的商业变现价值。

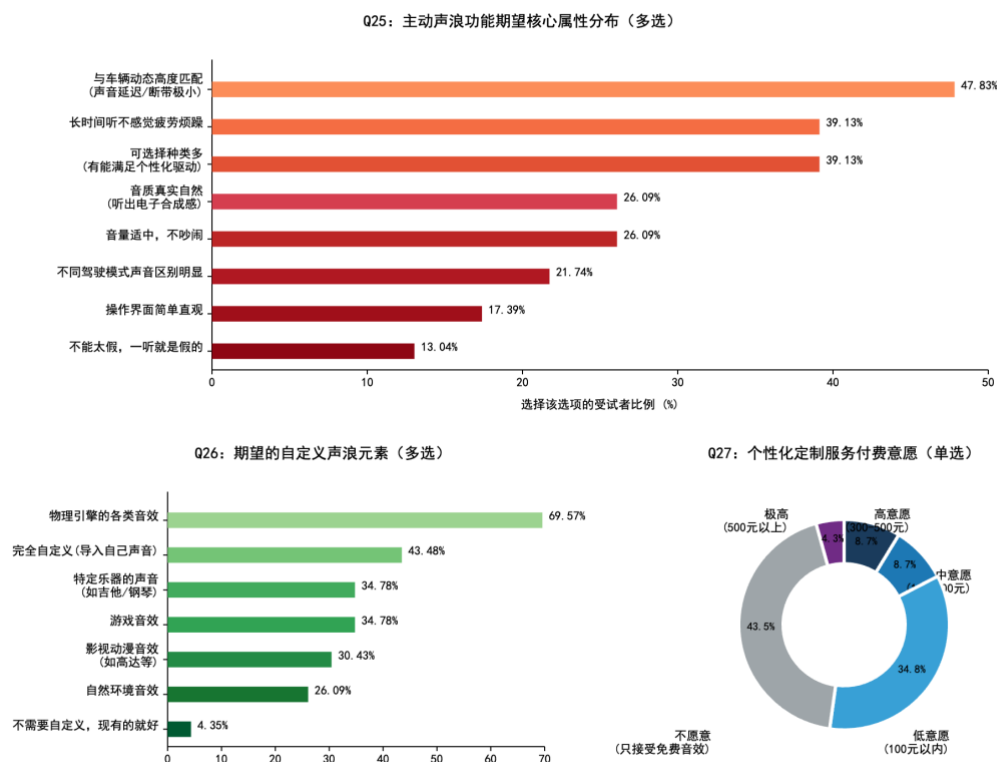


图 1.20 Q25-27: “主动声浪模拟” 用户期望与付费意愿

第三节 现有设计的优缺点

通过以上对 AVAS 与主动声浪模拟的调研, 结合用户的反馈与偏好, 总结调查数据分析结果, 基于以上内容做调研小结, 以此分析现有设计存在的优缺点。有以下几点核心发现:

首先是关于 AVAS 的调查内容的核心发现, 第一点是用户普遍对 AVAS 的认知度不足, 不到一半的用户仅听说过此功能, 深度了解和使用 AVAS 的用户占比很少; 第二点是目前车型搭配的 AVAS 音效同质化严重, 能够明显听辨出不同品牌车型的用户占比仅 13.04%, 大部分的用户表示根本没注意过不同车型的区别; 第三点是用户对现有的 AVAS 设计满意度一般, 平均分只有 6.97 分 (加权后), 改进的空间还很大; 第四点是用户对 AVAS 的个性化需求很强, 超过 70% 的用户反馈需要加上更多的调节维度和音色选择, 目前的设计还比较单调; 第五点是用户对目前设计具有较高的智能化期待, 50% 以上的用户支持可以通过不同环境场景自动调节。

其次是关于主动声浪的调查内容的核心发现，第一点是用户的整体接受度比预想的偏高，56.52%持正面态度；第二点是虽然用户的整体接受度高，但是使用率却很低，仅有少部分人会经常开启，而多数人只是偶尔开启，未使用过的人占比超过四分之一；第三点是目前的主动声浪设计痛点明确，选择少、易疲惫等问题普遍存在；第四点是个性化需求的提高，超过 60%的用户要求加入可自定义的功能；第五点是主动声浪模拟对用户来说具有较高的付费意愿，一半以上的用户表示愿意为此付费。

从以上几点核心发现中可对现在的纯电汽车主动声音设计绘制精准的用户画像与需求矩阵，分为五种用户类型（性能狂热者、科技潮人、豪华品质派、实用理性派、家庭用户），按照人群特征、AVAS 偏好、声浪偏好、个性化需求四个维度分析用户画像，最后总结其代表性。

用户类型	人群特征	AVAS 偏好	声浪偏好	个性化需求	代表性
性能狂热者	男性、26-35 岁、购车预算>30 万	运动激进型	V8 引擎模拟	极高（多种赛道模式）	18%
科技潮人	年轻、90/00 后、关注新技术	科幻未来型	电子合成音	高（订阅制、IP 联名）	25%
豪华品质派	中年、购车预算>50 万	豪华优雅型	无需或柔和背景	中（预设几种高端方案）	15%
实用理性派	各年龄段、预算 20-30 万	简约实用型	不需要	低（开关即可）	28%
家庭用户	有子女、35-45 岁	柔和温暖型	儿童模式	中（场景切换）	14%

表 1.4 用户画像与需求矩阵

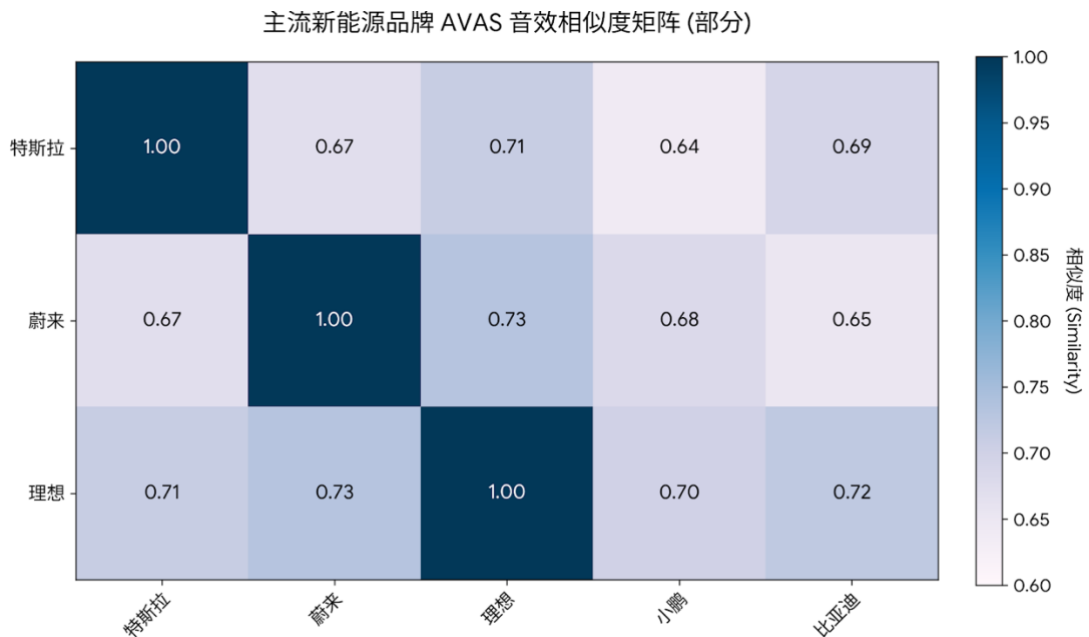
从用户画像中可知，现在主动声音设计的用户多是一些年轻用户，购车预算在 20-30 万，追求科技潮流且对个性化的需求较高；而家庭用户和追求豪华品质的高预算用户更偏好柔和温暖与豪华优雅的音色，个性化的需求相对较低。由以上核心发现与用户画像，下文对目前主动声音设计存在的优点与缺点分别展开分析。

一、优点

现有车型的主动声音设计具有以下几个优点：第一个优点是安全性都得到保障，从法律的合规性来看，所有调研车型均满足 UN R138、GB 37153 标准，AVAS 在 0-20km/h 速度段均有效工作，声压级达到 56-75dB(A)@2m，满足可听度要求。从实际效果上来看，欧盟数据的研究表明配备 AVAS 的电动车与行人碰撞事故率下降约 37%，视障人士对 AVAS 的识别率达 92%，所以目前设计的声音是满足安全的基本需求的。第二点是目前已经开始品牌差异化的初步探索了，头部品牌已形成初步的识别度，宝马、奔驰、保时捷等品牌在盲听测试中识别度都超过 50%，并且形成了基本的音色风格。第三点是目前的技术实现路径是成熟的，硬件基础中车载扬声器的系统功率充足，数字信号处理 DSP 的普及，能支持日益强劲的音频算法模型，传感器对速度、加速度、转向角度、踏板深度等数据实时传输的延迟越来越低，可实现无感数据传输；软件生态中 Wwise、FMOD 等中间件应用让声音设计项目可快速落地验证，同时各大厂商的音效库资源也很丰富，可以从中获得很多声音设计的素材与灵感，汽车厂商的 OTA 升级也支持声音功能的更新。第四点是用户教育程度也初见成效，AVAS 的市场认知度从 2021 年的 23%到本次调研的 69.67%，同比增长 202.91%，从媒体关注度方面“电动汽车声音设计”相关的视频和文章也在快速地增长，宝马与 Hans Zimmer 的跨界合作引发了大量的话题热度。

二、存在的问题

虽然现有的主动声音设计具有以上诸多优点，但是也存在许多亟待解决的问题。第一点是同质化严重的问题，通过声学指纹（Acoustic Fingerprint）技术，对 12 款车型的 AVAS 进行相似度分析后发现，国内新势力品牌间相似度高达 0.65-0.73，同时用户调查中也发现大部分的用户对 AVAS 的分辨能力普遍偏低。

图 1.21 不同车型 AVAS 相似度分析¹

第二点是个性化严重不足，据前文市场调研结果显示，多数品牌车型的调节可选项较少，宝马 iX 只有一种 AVAS 可调项，车内声浪只有三档音量可调，甚至有部分车型对此功能不可调。目前像特斯拉等不可调车型占 28%，56% 的车型只有 2-3 种初级可选功能，仅蔚来等少数车型提供较多选择，从用户调研的结果来看，接近 70% 的用户希望有多种选项可选可调，所以用户期待与现实情况存在着较大的差异。

第三点是声音的品质参差不齐，存在着较多的音色问题，某些车型高频过强而产生刺耳感，由于频率过窄而缺乏层次，谐波结构不自然而产生的不协调感等等，曾经就有国内某品牌 AVAS 被用户投诉像警报声、某自主品牌主动声浪电流噪声感明显的案例。从技术原因出发，主要是缺乏专业的声音设计师的参与，某些车企的声音部门没有专门的声音设计背景的职员，从事该工作的是 NVH 工程师等；其次是某些车型对声学开发的预算不足；最后是缺乏大量的测试与验证。

第四点是动态响应不匹配的问题，首先表现在油门踩下去到声音产生变化的延迟时间达到人能察觉的范围；其次是音量、音高与速度非线性关系处理不当导致的曲线不自然的现象；最后表现在模式切换突兀，从舒适切换到运动声音瞬间变化，缺少一定的变化曲率和缓冲时间。从前文的调查结果显示 47.83% 的用户认为声音与车辆实际动态不

¹ 数据表明所有对比组相似度均>0.6，属于“高度相似”范畴，呈现明显的行业同质化趋势

匹配，更有专业媒体评价其声音与加速感脱节。第五点是场景适应感差的问题，目前大多数的车型 AVAS 音量固定且不区分场景，在小区内夜间或清晨存在扰民的现象，而在闹市区又不够响，行人注意不到车辆的靠近，在地库中回声被放大产生刺耳感。在车内的场景中声浪也很少考虑乘客的感受，驾驶员在开启运动声浪后，后排乘客和儿童会有不适感，现在的车型并没有针对性地推出“乘客模式”等场景化定制选择。第六点是用户的教育程度不足，调研发现在拥有主动声浪模拟的车主中有一半以上的用户不知道该如何开启，在菜单栏的设计中该功能藏在多级菜单中很难被发现，说明书更是没有详细的介绍内容，所以导致该功能的闲置率高，用户的感知价值低。第七点是缺乏持续更新的机制，仅有少部分的车企支持 OTA 声音更新，大多数品牌出厂即固定，无用户反馈迭代机制，导致该功能一直停滞。对比其他行业，智能手机的铃声具有海量资源可以随时更换，游戏行业的音效包持续更新，汽车行业则相对僵化保守。

三、改进方向——个性化设计

基于以上的优缺点分析以及用户调研结果，提出“个性化设计”这个核心的改进方向，个性化设计的必要性体现在以下几个方面：首先是从用户需求端出发，要求提供多种选项与自定义可调的用户在调查问卷中占比很大，用户的付费意愿也很强；其次是在市场竞争端，现有产品同质化严重，需要提升各个车型的差异化，品牌的价值需要通过声音来传递，个性化也是消费升级的趋势；最后是在技术可行性上，随着车载算力的发展，现在具有足够的冗余算力，给实时声音的运算提供了条件，车载系统 OTA 升级已经很普及，声音的合成技术也日益成熟，这些技术的发展为实现个性化声音设计提供了基本的技术前提。

本章小结

为了深度了解目前电动汽车主动声音设计的市场情况和用户需求，本章开展了深度的市场调研和用户问卷调查。现有设计在 AVAS 方面所有品牌皆有配备，且满足法规要求，一些头部品牌已形成初步的辨识度，但整体的同质化还是比较严重；在主动声浪方面，仅有部分车型配备该功能，新势力品牌逐步开始探索，豪华品牌设计更加精致，但用户的认知度和使用度较低。用户调查结果发现个性化的需求强烈，对智能化的需求也很高，智能场景自适应有很高的市场前景。

第二章 个性化主动声音设计

在完成第二章对现有不同品牌车型的市场调研和用户需求调查的基础上，本章将参考第二章总结的优缺点与改进方向，着手开始设计纯电汽车的主动声音。设计分为两大模块，第一是 AVAS 的设计，在符合法规的基础上设计了三种个性化 AVAS 音效，可根据不同场景自适应切换；第二是纯电汽车的主动声音设计，设计了三种个性化的模拟声浪，还提出了音乐互动驾驶的原创性汽车声音设计方案，上述方案均以声音合成技术、心理声学、音乐学等为基础，旨在通过用户反馈和多学科融合思维建构完整可落地的纯电汽车声音设计方案。

第一节 AVAS 音效设计

AVAS（Acoustic Vehicle Alerting System，声学车辆警示系统）是考虑电动汽车在低速行驶时噪声极低容易增加安全隐患所设计的安全警示系统提示音，所以在设计声音之前需要了解国内外相关法规规定，特别是对中国的相关法规需要详细地解读。在合规的基础上设计声景融合、科幻电子、音乐氛围三种个性化 AVAS 音效，并根据不同场景可自适应调节和切换。

一、相关法规

AVAS 法规是设计声音的边界底线，设计时必须满足强制性法规要求，在满足必要性的前提下寻找创意空间，虽然现在某些设计软件（如 Simcenter Testlab）已经把法规内置到设计功能中，但是深入了解全球主要地区的法规要求对本研究来说仍然具有重要的实践意义。

（一）国际主要 AVAS 法规

目前，全球已有多个国家和地区对 AVAS 作出强制性规定。联合国欧洲经济委员会（UNECE）于 2016 年发布的 UN R138 是国际 AVAS 法规的重要参考基准，该法规被欧盟、日本等多个经济体直接采用或参照实施。美国由 NHTSA 颁布了 FMVSS No.141，中国发布了推荐性国家标准 GB/T 37153-2018，并已推动相关内容纳入强制认证体系。

法规/标准	发布机构	适用地区	适用车速	声级要求	强制实施情况
UN R138	UNECE	欧洲及多国	0 - 20 km/h	50 - 75 dB(A)	2021 年起新车型强制
FMVSS NO.141	NHTSA (美国)	美国	0 - 30 km/h	47 - 67 dB(A)	2019 年 9 月强制执行
EU NO.540/2014	欧盟	欧盟成员国	0 - 20 km/h	与 UN R138 一致	2019 年 7 月全面实施
GB/T 37153-2018	中国 SAC	中国	0 - 20 km/h	50 - 75 dB(A)	2018 年推荐，逐步强制
GB 7258 (修订)	中国工信部	中国	0 - 20 km/h	参考 UN R138	2021 年后纳入强制认证

表 2.1 国际主要 AVAS 法规

(二) 中国 AVAS 法规体系

由于本研究的应用场景是在中国市场，所以有必要对中国 AVAS 法规体系进行更为深入的专项分析。中国 AVAS 法规体系发展规律是先发行推荐性的标准，然后再跟进强制性的认证，最后多部门协同跟进，其发展脉络与监管结构均有别于欧美体系。

中国 AVAS 相关标准的发展可划分为三个阶段。第一阶段（2016 年以前）：中国尚无专项 AVAS 标准，纯电车辆车外声音基本处于无规范状态，部分企业参照欧盟早期草案自行设计。第二阶段（2016—2020 年）：随着新能源汽车保有量快速增长，涉及电动车辆无声行驶的交通安全事故引发监管关注，全国汽车标准化技术委员会（SAC/TC114）启动 AVAS 标准制定工作，于 2018 年正式发布 GB/T 37153-2018《电动汽车用驻车 and 低速行驶提示音》，作为推荐性国家标准实施。第三阶段（2021 年至今）：工信部将 AVAS 相关指标纳入《机动车运行安全技术条件》（GB 7258）修订内容，逐步推动 AVAS 要求进入强制性认证（CCC）体系，新申请型式认证的纯电车型均须提供 AVAS 系统合规证明，该要求已实质上具备强制执行效力。

GB/T 37153-2018 是迄今为止中国在 AVAS 领域最为完整的技术规范文件。该标准

在声级范围、频率覆盖、速度依变性等核心参数上与 UN R138 高度对齐，体现了中国标准国际化接轨的政策导向；但在测量方法细节、认证程序要求和部分场景豁免条款上存在本地化差异。该法规适用于 M1 和 N1 类的纯电汽车，技术细则要求车辆在 0-20km/h 的低速状态行驶时必须自动开启 AVAS 提示音，且不同速度段的声级要求不一样，0-10km/h 匀速行驶时规定总声压级不能低于 52dB(A)，10-20km/h 匀速行驶时总声压级不能低于 58dB(A)，任何时段最大声压级不能超过 75dB(A)。在频率要求上，提示音的频率范围应该在 315Hz-8000Hz 之间，且至少包含两个 1/3 倍频程频段而且至少有一个频段在 1600Hz 的 1/3 倍频段之下或之内，频率规定的目的是提高 AVAS 声音的可定位性和警示性。声音的范围应该为连续的声音，还需要对车辆的加速、减速等行为具有可识别性，值得注意的是，不仅对频率范围做了规定，法规还规定了在频率范围内至少一个音调会按照车速的比例变化，移频要求在 5-20km/h 的速度范围内，向前行驶每 1km/h 至少变化 0.8%。法规对开启条件也有要求，车辆必须在启动时自动开启 AVAS 提示音，倒车时也必须强制发声，按照规定，该声音在每次启动后是不能自行关闭的。虽然中国的法规为了安全考虑对 AVAS 设计有较大的限制，但是法规也允许车辆生产商在符合法规的基础上提供多种风格的声音可供选择，这给设计者留出了个性化的空间，AVAS 音效不仅车内的驾驶员可以听到，车外的行人在识别车辆的时候也可根据个性化设计的声音识别具有特性的品牌声音，高质量的汽车声音设计可在符合相关法规的基础上自由地设计声音效果。

为了方便验证是否符合规定，法规也提供了测试方法，测量分为声级测量和移频测量，声级测量需满足 10-20km/h 匀速行驶，移频测量是为了验证频率随车速变化的特征是否符合规定。测试条件需要满足传声器距离车辆中心线 2.0 ± 0.05 米，地面以上 1.2 ± 0.02 米，且背景噪声 A 加权声压级要比测试信号至少 10dB，测试场地既可以在室内半消声室也可以在室外测试。

二、个性化设计思路

合规框架的约束之下，本研究提出三种个性化设计的思路，并按照思路使用 Studio one 和 Wwise 制作对应风格的 AVAS 音效。个性化设计的思路来自于第二章调研结果和游戏影视等相关行业，也来自于声音、音乐等相关学科的理论，具体思路阐释和实践步骤如下：

（一）声景融合

声景融合的设计理念源自声景学（Soundscape Studies）。“声景”最早是由加拿大作曲家、音乐教育家 R. Murray Schafer 在 20 世纪 60 年代正式提出，他在西蒙菲莎大学发起了著名的“世界声景项目”，这套理论体系将声学环境进行了系统的分类，可分为基础音、信号音与声音标记。基础音指的是环境中的风声、潮汐声、交通底噪等无处不在的声音，这些声音往往都是潜意识听到而没有引起注意的背景声；信号音是在背景中凸显出来的声音，需要倾听者有意识地去注意到；而声音标记指的是某地区或某时段声音环境中独特存在的标志性声音。声景理论一开始就主张人主动地参与声环境的建设，像作曲家一样有意识地去构建声音生态，犹如一个声音设计师一样，而作品就是整个声学环境。

将声景学理论融入 AVAS 设计中，符合声景学中人为建设声环境的主张。在以往汽车所产生的声音中，大多都是被视为噪音的声源，汽车发动机和鸣笛声成为城市噪声污染的一部分，人们想尽办法去控制由汽车所产生的声污染，汽车设计之时也会特意的注意其产生的噪声是否符合城市规范。随着动力源从燃油机转向了电能驱动，汽车从有声变为无声，过于安静又会减少汽车的警示性，这给汽车声音设计带来了机遇，汽车从被动地发出声音变为主动的设计声音，作为可设计的声音发声体，那么让汽车的声音融入到城市声景中，变为城市声音景观的构成部分，可改善由交通所产生的城市噪声污染。

传统的 AVAS 设计思路是让警示音和环境音作为两个对立的声主体，依靠的是响度的竞争；声景理论给 AVAS 设计的思路是将警示音融入到环境声场中，靠的是频谱间的共鸣与心理声学效应。参考声景学理论的分类思路，AVAS 核心设计原则可分为基调音（Keynote）与信号音（Signal）两个分层，传达的理念在于用频谱特征而非响度传递信息，可辨识度不等于刺耳性。在技术实现路径上，可通过频谱塑形技术对自然声源（如水声、雨声、风声、树叶沙沙声等）做频谱的重新塑造，通过自然声素材的某段频率成分的加强或减弱（根据需求也可以切除或增加某个频段信息）实现频域上的重新塑形。然后再通过时间包络处理让车速与调制频率关联和匹配，并设置合适的 Attack 启动时间防止速度急剧变化所产生的声音突变，最后使用 LFO 动态调制频谱，模拟自然的“有机感”。

结合上述设计思路，衡量现有的不同数字合成器与音频处理器，决定选用 iZotope

Iris 2 这款基于频谱采样的软件合成器作为“声景融合”风格 AVAS 设计的示范。Iris 2 的独特优势在于它可以基于采样录音，在频谱图中自由划定选取频段，再由我所选定的区域做声音调制处理，其具有强大的可视化频谱编辑功能非常适合处理自然声这类通过采样合成处理的风格。这款软件设计的基本思路是将样本拖入选框内，然后按照不同频率层级划分框选频段，再结合频谱调制合成对应的声音。具体的技术实现步骤如下：

第一层是自然声景层，将导入的自然声音素材进行特定频段的框选，过程中不要播放整个声音，而是要使用工具栏的 Magic Wand 与 Brush Tool 工具对特定选段的声音全段进行筛选监听。选定范围推荐使用横向的矩形范围，通过 Sample1 中的可视化窗口观察样本的谐波频率，框选合适的频率范围，注意不要过于集中于某一频段，此时播放样本素材发现已经不是原始的自然声，而是带有了和弦音色彩的自然声颗粒。

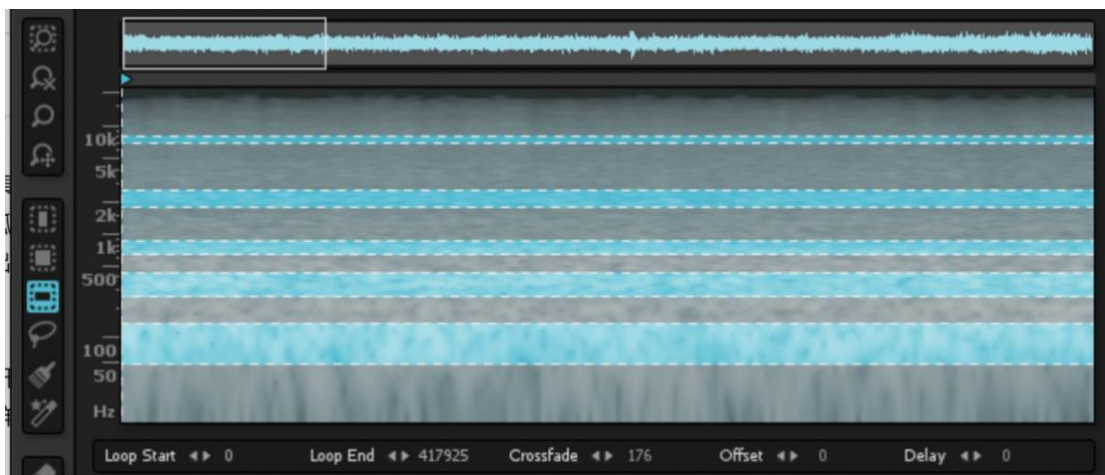


图 2.1 Sample1 窗口中特定频段的框选

第二层是法规基础层，选取采样特定频段采用的是减法的逻辑，为了能够符合相关法规以及增加声音的丰富性，可在选定频段范围后不继续使用采样，而是使用基础波形增加某一频段的内容。在 Iris 2 中内置有 Sub Oscillator 调制功能，根据音色需求选定某一基础波形（正弦波、三角波、方波等）进行频率调制，注意频率设定需要在法规要求的频率范围内。同样，第二层的基础波形也可以从 Sample 中调用，调用的基础声也可以按照需求框定特定频段，最后第一层和第二层按照合适的大小进行 Mix 混合。



图 2.2 法规基础层

第三层是瞬态信息层，该层是为了增加声音的瞬态响应，在车辆起步的瞬间作为瞬态提示音，可截取样本中某个具有瞬态表现的时段，只保留音头部分，控制 Attack 在几毫米范围之内。把三层声音信息都设计完毕之后，按照合适的音量比例混合成一个样本音后，此时的声音还处于静止稳定的发声状态，无法随着环境和驾驶状态的变化而改变，对此需要对声音进行 LFO（低频振荡器）动态调制，可选择样本的采样播放点或滤波截止频率点，将一个缓慢的正弦波 LFO 映射到自然声景层中。这样自然声会产生不断微小的变化，模拟自然界中一些随机感和不确定性，避免长时间触发而产生疲劳感。同时可调整声音的 ENV 包络曲线，为了符合自然听感可适度增加 Attack 和 Release。



图 2.3 瞬态信息层

（二）科幻电子

科幻电子风格核心思想是摒弃模仿燃油机的低速声，而是利用复杂的电子合成技术重塑声音，制造出现实中不存在的音效，但是却符合主观审美，实现从科幻到可听的转换。设计思路是从频段分层开始，首先是最基本的底层持续音，一般为低频正弦波或锯

齿波等基础波形，频率在 80-150Hz 之间，并且会随着车速升高频率；其次是中层纹理音，可通过 FM 或粒子合成等方式产生金属质感和电子嗡鸣声；然后是上层特征音，以 2000-5000Hz 的高频为主，辅以周期性的扫频，制造一种脉冲感和呼吸感，强化科技的氛围；最后是空间层，该层主要是做空间化设计，可添加一些短混响和轻微立体声拓展效果，从而增加空间感又不影响空间定位。

在确立基本的设计思路后，本研究将选用 Serum 2 这款数字波表合成器作为示例，着手从设计到技术实现：

第一步是要建立基本的底层听觉，作为声音中的最底层，频率成分在整个合成声音系统中占最低（80-200Hz），以氛围性的 Pad 音效为主，设计时参考了钢琴低音区沉稳的共振音，所以第一个振荡器选择钢琴的原始采样声，音符选择 G1 和 C3 构成跨音区的纯四度关系用以丰富低频声音的谐波成分；第二个调制振荡器选择基础的锯齿波，为了减少锯齿波带来的撕裂感，需要将 Unison 调整为 4 提升声音的厚度和宽阔度；第三个振荡器选择 Synth Bass 增加声音的低频能量感。最后将三个振荡器按照合适的比例混合后过滤掉刺耳的高频，调整合适的 ENV 与 LFO 即可。



图 2.4 Serum 2 示例

第二步是建立中频的脉冲响应，与建构基础底层听感最大的区别是需要用 LFO 去调控 Filter 中的 Cutoff 参数，使声音在频率上不断地运动，但要注意调制的频率不能太快或太慢，需要符合主观可接受的频率范围。声音的构建相对简单，用 SawRoundedToSquare 波形去 Basic_Wrd，从而产生一种类似于电机工作时的中频转动声，

最后选用合适的音高（推荐比基础音高一个八度）产生足够的谐波频率即可。第三步是增加高频的电流声用以提高声音的可辨识度，该声音从频率上需要比前两步都高（2000-5000Hz），选用基础正弦波叠加 **Scream** 波形制造高频的电噪感，增加一定的 **Unison** 值用于减少刺耳感，最后使用较快的启动和释放时间即可形成。声音的基本形态构建完成之后，此时各个层级分离度较高，缺少一定的融合性，可选用微量的粉红噪声融合各个频段，使声音成为一个密不可分的整体。

（三）音乐氛围

从第二章的调研结果发现目前某些汽车厂商已经从以科幻电子风格转向了具有音乐性的 AVAS（如宝马和汉斯季默合作的 **IconicSounds**），从用户的反馈中也有 34.78% 的受访者表示更喜欢具有旋律性的声音，说明具有音乐性和旋律性的 AVAS 是实现个性化必须要考虑的设计方向。与传统模仿内燃机噪声和科幻合成类音效不同，这类具有音乐性的设计需要考虑和声叠加和动态混音等多方面的音乐理论，不能只依赖单一波形的音高偏移。

核心的设计思路是通过动态编曲的方法将音乐的发展和速度匹配，动态运动需要稳态来支持，所以首先需要设计一个在任何时间节点都可以截取并和谐播放的氛围类音乐（类比音乐制作中的 **Pad**），然后再按照不同的频段拆分成三个情绪层：第一个是怠速或静止层，设计一个持续的低频或者舒缓的 **Pad** 音色演奏和弦的根音，给车一个最基础的怠速声，表示车辆已通电准备随时就绪。第二个是 0-10km/h 的低速层，从这里开始叠加和声，引入纯四度或者大三度等合成音色或者频谱塑形后的乐器音色，选择合适的调式音阶，推荐使用自然大调或者五声音阶，避免使用过于复杂的和声音阶或和弦所导致的听觉疲劳；第三个是 10-30km/h 的加速层，此时已有根音层和和声层，缺少旋律层和律动层，可引入 **Riff**（连复段）或 **Arpeggio**（琶音），再使用 **LFO** 动态控制滤波的截止频率实现音乐产生流动感。



图 2.5 音乐氛围 AVAS 动态编曲

音乐类 AVAS 不能像传统 AVAS 一样简单地让声音的音调与车速正相关，在音乐理论中如果把和弦按照音分移调会变得非常奇怪，所以音乐氛围类表达加速需要使用一些高级音乐技巧：首先可以参考谢泼德音调（Shepard Tone），这是一个经典的听觉错觉，把多个相隔八度的音阶交错淡入淡出会让人产生音调无限上升的感觉，可利用该效应制作纯粹音调上升的加速感；其次是通过滤波扫频的方式实现加速感，让低通滤波器的截止频率与车速关联，车速越大滤波就越少，释放的高频信号就越多，这样就实现了随车速从低频到高频的自然过渡；最后是使用音乐层面的节拍律动加速，该加速可以与 LFO Rate 联动，让琶音器的速度被 LFO 速率控制从而产生随车速动态变化的感觉。

（四）自适应转换

在问卷调查中有大量的用户想要给 AVAS 添加自适应转换功能，AVAS 场景自适应转换（Context-Aware AVAS）也是目前新势力造车品牌和豪华车企正在尝试的主动声音转换类功能，它会根据汽车现在所在的场景（如城区到郊区）自动调整为最符合当前场景的 AVAS 音效。

要实现该功能，首先就需要从输入端入手。想让汽车知道现在处于哪个时段哪个场景，这高度依赖汽车的多维度感知技术，可以从定位感知、视觉感知、环境噪声感知等多维度感知信息中选定某些数据作为场景声音变化的触发器。视觉感知维度是从时间与光线中触发，通过车外摄像头判断车辆所处环境与时段；定位感知维度是从卫星定位目前所在位置，再判断该位置属于哪一种场景；气象与环境噪声感知是由车外传声器拾取

到当前环境中是否存在如雨天才有的极强的宽带白噪音，从而判断当前所处环境的情况；当然也可以由驾驶模式主动切换 AVAS 音效。

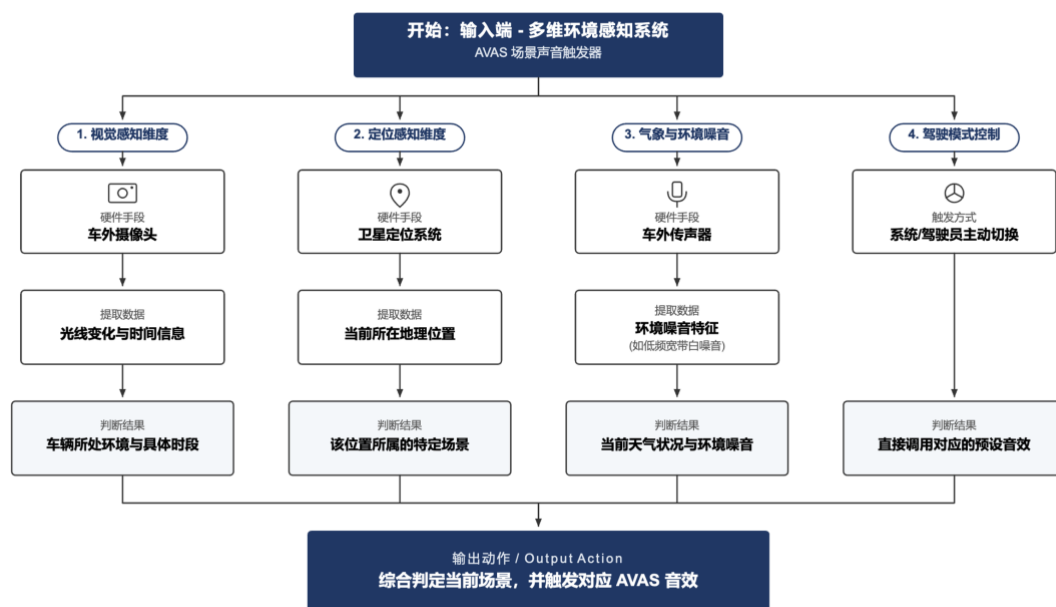


图 2.6 AVAS 自适应转换触发流程

场景切换不仅可以从不同风格的 AVAS 中切换，还可以由同一风格的 AVAS 音效的不同变体中切换。如音乐氛围类的 AVAS，在深夜的住宅区可以主动去掉复杂的琶音与律动层，只保留最基本纯音，或将和弦简化为较为简单的音程关系从而达到克制不扰民的效果。又比如在嘈杂的商业街和比较复杂的交通路况中，声音穿透力要比较强才能提高行人的警觉性，可以引入具有颗粒感的合成质感音，加入轻微的频率调制释放更多的高频，这样声音的锋利感就把它从复杂的环境噪声中脱颖而出。不同场景转换的时候还需要考虑过渡的问题，绝不能像切歌一样瞬间转为另一个声音，这样会非常突然甚至会让驾驶员和行人感到惊吓。场景自适应转换需要加配一个过渡系统，当卫星定位识别到车辆从主干道驶入住宅区时，系统应该使用一个跨度极长的交叉淡化（Crossfade），用时 5-10 秒的时间，极其缓慢地拉低嘈杂模式的同时拉高深夜模式的音量。除了音量渐变外，在合成器内部也可实现参数渐变，不是粗暴地切换合成器中的预设，而是利用宏控制功能在 3-5 秒之内比较缓慢地去改变某些参数从而达到自适应转换的效果。不过音乐性的 AVAS 不能与上述两种方式一样，音乐具有明显的节拍与乐句性质，所以在切换时必须卡在节拍结束的时候才能保证听感的和谐和统一。

第二节 车内主动声音设计

区别于以往燃油汽车内有来自于内燃机的声浪反馈，纯电汽车驾驶座舱并没有随着驾驶状态(转速、加速度等)而变化的车内声音²。车内主动声音设计(Active Sound Design)可从以往被动地接受声音变为主动地去设计车内想听的声音，声音的可选择性和听音的自由度大幅提升。车内主动声音设计除了可以提高交互性、增加驾驶乐趣以外，还可以从声音上提示驾驶员车况信息。本节将从两个主动声音设计思路入手，根据第二章的调查反馈设计三种风格的个性化声浪模拟，其次是设计互动音乐驾驶，提高传统音乐驾驶的互动性。

一、个性化声浪模拟

声浪模拟(Sound Wave Simulation)是通过车内扬声器系统重放模拟的声浪信号，再将模拟的信号关联上踏板深度、加速度、转速等驾驶行为参数，达到声音随驾驶信息动态变化的效果。目前车内的主动声音设计处于模拟传统声浪的阶段，不论是哪种风格的模拟，现阶段的声音设计虽然已经具有一定的风格趋势，但是调研结果显示现在的设计还是存在较大的同质化的现象，品牌辨识度普遍偏低。针对以上困境，本研究设计了以下三种车内个性化主动声音：

(一) 传统燃油车声浪模拟——运动跑车风格

汽车声浪之所以让人着迷，是因为它不仅仅是一个静止的声音，由内燃机运行所产生的声音是与驾驶状态高度相关的动态声音系统，有经验的驾驶者可根据声音反馈判断车速等驾驶状态。传统燃油机的发动机声浪本质上源于其复杂的物理机械构造所产生的谐波结构，该结构与发动机的转速等信息相关，具有动态非线性的特征。纯电汽车想要复现类似的听感就必须先建构车端物理参数与虚拟声学物理量之间的映射关系，阶次合成的基础就在于把物理振动所产生的目标声音分解为与基频相关的谐波分量，计算公式为：

$$f_n = \frac{RPM_{virtual}}{60} \times n$$

² 纯电汽车并不是完全无声，车内有从窗外传递的风噪和胎噪，还有来自于电机的微弱高阶次噪声

其中 n 代表具体的阶次，在加速的过程中踏板开度只是作为输入一个非线性系数的参数，与虚拟转速的提升斜率相关，同时还关联整体的增益。通过这一转换，电驱动的加速过程也能转化为具有机械反馈的虚拟转速频率。

确立好虚拟转速的映射关系之后，跑车风格的声浪设计可通过增加或者衰减特定阶次，从而达到目标的听感，类似于手术刀一样对频谱进行精准的重构。以传统的大排量 V8 发动机为参考，采用“强化主体-引入半阶-抑制杂音”的设计原则，首先需要增大能量分布最多的低阶次，特别是 4 阶、8 阶、12 阶等偶数阶次，因为影响听感中的厚重感和稳定感的成分主要集中在这些低阶偶数次谐波中。其次为了增加声音的真实性，减少数字合成的廉价感，还需要引入非整数的半阶次，如 0.5、1.5、2.5 等阶次，因为在真实的机械物理中并非全都是规则的振动模式，气缸燃烧不充分不均匀与排气歧管的复杂声学干涉会引入这些半阶次的声音信息，在设计中刻意的增加一些低频半阶次的振幅可以有效地提高声音的起伏感，在怠速和低速的时候能营造出跑车特有的喘息感。然后，可减少奇数阶次与某些高数阶次，因为随着虚拟转速的提高，容易出现导致声音浑浊的阶次谐波，同时电机在加速工况容易出现高频消叫，所以需要 10KHz 左右的高频进行严格的声学掩蔽或剔除。最后在深踩踏板的高负载工况时瞬间放大 10 阶以上的偶数阶次，可模拟出跑车在极限加速时的声浪撕裂感。

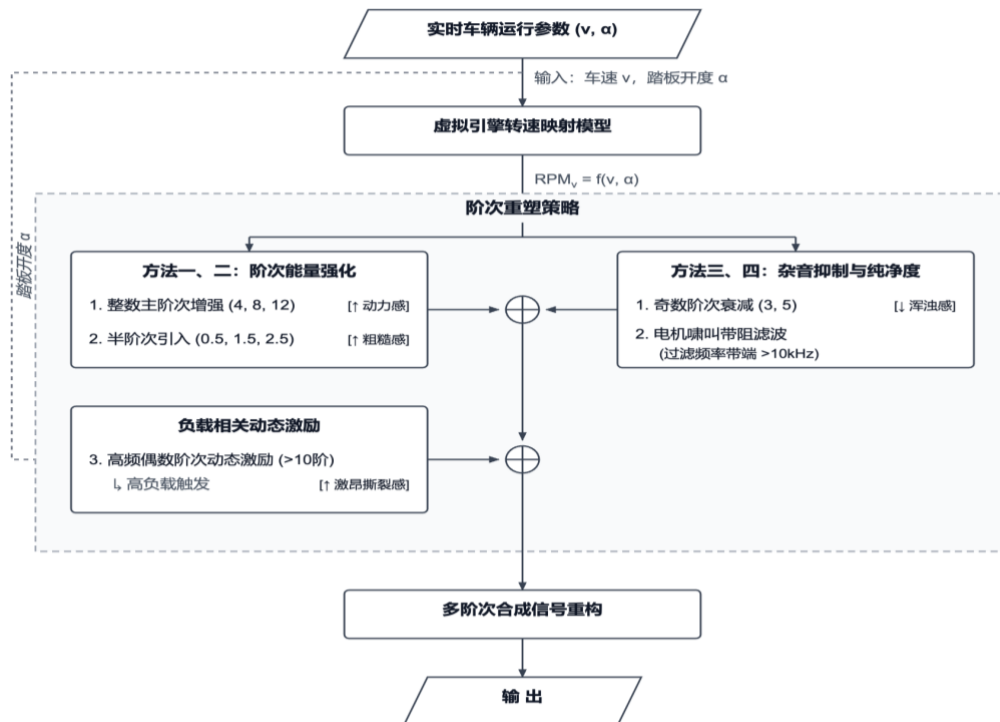


图 2.7 运动风格声浪阶次合成方法

（二）电子科幻风格声浪设计

模拟声浪并非只有模拟燃油机噪声一种方式，智能电动汽车的声音应该有自己独特的音色符号，和传统的燃油机不一样，安静的座舱提供的可自定义性很高，智能化是未来纯电汽车的趋势，所以主动声可以结合现在汽车科幻未来的风格设计，创造出属于纯电汽车自己特有的电子科幻风格的声浪。设计的灵感可以从某些电子游戏中对游戏车辆的声浪设计，或者类比影视中对科幻飞行器的声音设计风格，再结合第二章中的调查结果，设计符合个性化需求的电子科幻风格的声浪。

合成方法首先可选波表合成法，使用不同类型的振荡器合成一个具有丰富听感的音色，其次可以选择粒子合成法，将微小切片不断地重复调试从而产生新的富有变化的听感。核心设计思路在于用能量涌动来代替内燃机的爆破，既要保留传统内燃机的声音反馈，也要突出数字化和极具未来感的音色特点。本研究将使用 Kilohearts 的 Phase Plan 作为示例来设计电子科幻风格的声浪：

第一步需要定义车辆的遥测数据，即设定 Macros 宏控制器，在 Phase Plan 的正下方有 8 个可供选择的 Macros 宏控制器旋钮，需要将其作为车辆数据的输入端口。为了画面整洁和思路清晰，可先对旋钮重命名，Macro 1 命名为 RPM（转速），用来控制声音的频率变化或抖动速度，Macro 2 命名为 Peda（负载），用来控制声音的高频释放以及音量变化，还可以用来控制失真度。

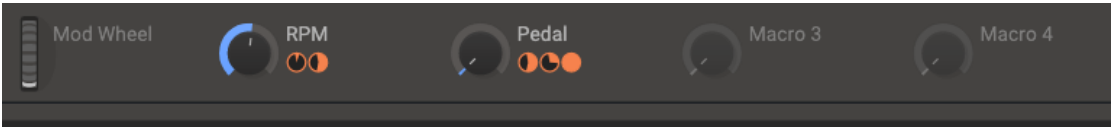


图 2.8 设定 Macros 宏控制器

第二步需要构建发生器模块（Generators）用于搭建引擎的本体声，一共需要三层，首先是底层共鸣，选择一个三角波或者稍微带点饱和色彩的正弦波用来支撑整个音色的低频，还需要将音调降低 1-2 个八度使音色类似于电车怠速时的深层嗡嗡声，在最后输出到效果器通道的 lane1；其次是推进层，这是体现科幻感的主要层级，加载一个具有共振感或金属感的混合复杂波表，比如 Cyber 或者 Spectral 系列，然后将 Unison（同声）调整到 3 或 4，再按照听感稍微调整一下 Detune（失谐）和 Spread（声场宽度），让声音听起来更加开阔，输出路由到 lane2；最后是高频气流层，选择一个略带调性或者具有特

殊色彩的噪声用来模仿高速行驶时的气流声，输出到 lane3。



图 2.9 三层发生器模块

第三步是用 Modulation 模块调制上述音色中的各个参数，使引擎声动态的变化。第一步中的 Macro 1 (RPM) 和 Macro 2 (Pedal)需要连接上特定的参数才能发挥其最具价值的动态声音功能，映射规则如下：首先需要将 RPM 映射到第二步的推进层中的音高参数，只对应 5 到 7 个半音即可，音高变化不宜过大，然后再添加一个随机性 LFO 模块，其中 Rate 对应 RPM，可做到车速越快，波表扫描的速度也就越快，表达出声音的流动性。最后是将 Pedal 映射到推进层和高频气流层的输出音量，目的是为了踩油门时表现出气流涌动的效果。

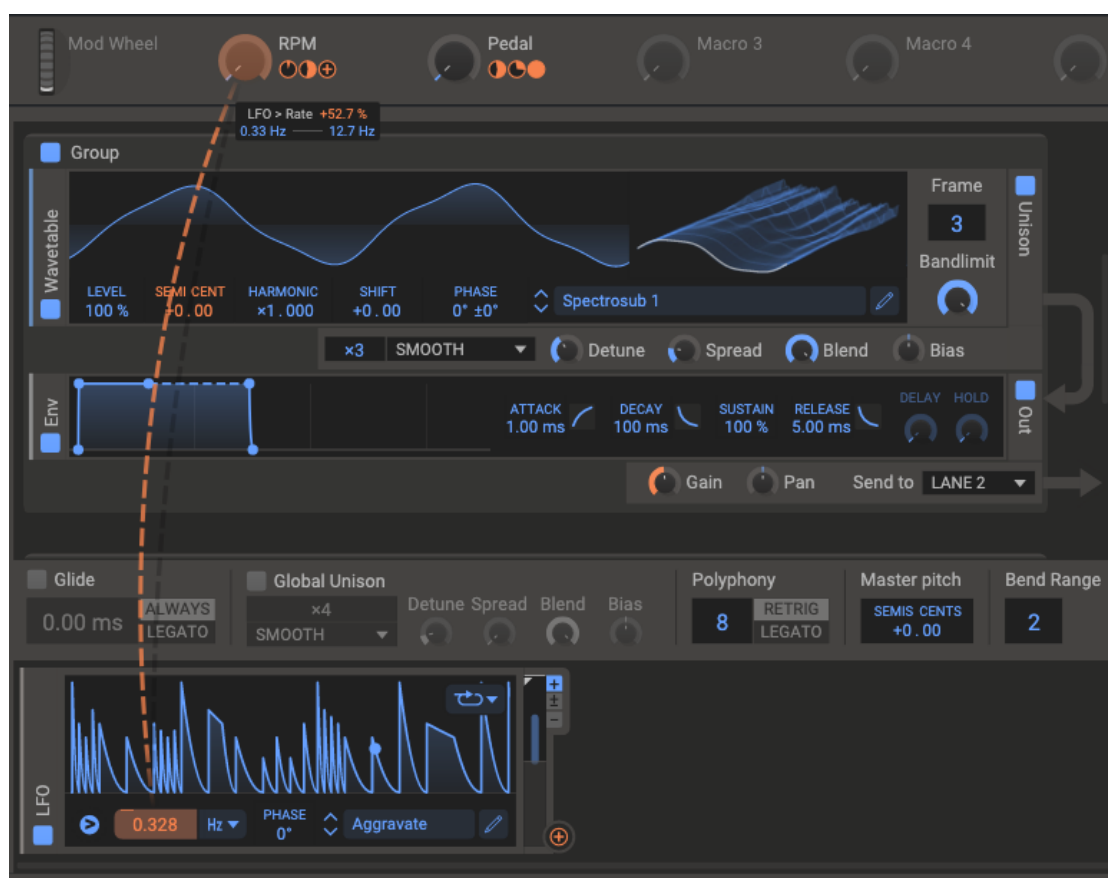


图 2.10 Macro 宏映射

第四步是使用效果器对声音进行塑形，在 Lanes 区域中允许添加各种效果器对设计的声音做变化，为了进一步提高科技感，在 Lane1 的低频层中加入微量的 Distortion 可以让声音变得更加磁性，再添加一个低通滤波器将高频滤除保留底层的低频；在 Lane2 的推进层中添加 Dispersion 效果器，可以模拟出类似激光的脉冲，接着进行动态滤波，将 Macro2 映射到新添加的 Filter 的截止频率，在深踩油门时滤波器完全打开变得刺耳，反之变闷；在 Lane3 气流层中加一个高通滤波器，只需要保留高频部分，然后再加一个短促的混响效果，营造出空气在金属管道中的空间感。



图 2.11 Lanes 区域中添加各种效果器

（三）音乐氛围类声浪设计——频谱音乐理论的应用

音乐氛围类声浪设计灵感来源于频谱音乐作曲理论（Spectral Music），是本研究声浪设计中最具实验性和前沿性的部分。频谱音乐发源于 20 世纪 70 年代的法国，该理论摒弃了传统依靠调式音阶和音数序列的作曲方法，而是专注于声音产生本身，转而借助计算机频谱分析技术（如快速傅里叶变换 FFT），将声音微观的物理属性——即声学频谱（Acoustic Spectra）及其内部复杂泛音列（Harmonics）的时间演变——作为核心的塑形材料。该理论的先驱热拉尔·格里塞（Gérard Grisey）认为声音应当被视为“在时间中被赋予方向的能量场（Force fields given direction in time）”，其内部的微观频段蕴含着如同有机体般诞生、波动与消退的动态生命力。

与传统声浪模仿内燃机物理机械运动不同，频谱音乐关注的是声音微观程度的内部泛音结构以及随时间变化的特性。设计的目的是想让汽车不再是一台机器，而是一台可以移动的大型乐器，所以它的加速过程不能只是简单地移高音调，而是伴随着泛音的改变而产生的音色的变化，核心的设计理念是从阶次的跟随到频谱的渐变，在稳定的基频的基础上将车辆状态关联上频谱中的上方泛音，从而改变能量分布和和谐度。

本研究将使用 Arturia Pigments 的 Harmonic 引擎来实现“频谱音乐式”的声浪设计，在开始设计之前先要在界面的最下方的宏控制区（Macros）将名字改为驾驶员输入

信号，如 Macro1 改为 RPM（转速），Macro2 改为 Pedal 负载，前者负责控制声浪的基本音调和明暗度，后者用来控制声音的爆发力和粗糙感。

第一步是要搭建基本的怠速底色，需要建立一个极其平滑且深邃的基础频率，也就是汽车没有行驶时的基础怠速声频段。首先是需要在主界面的 Engine1 中切换为 Harmonic 引擎，然后再将中间的 Partial（泛音数量）调低，只保留 8-12 个泛音即可，调整完成之后在低音区演奏会只有一个非常干净的类似管风琴的低频声。其次需要把 Tilt（频谱倾斜）向左调到负值，这样声音中的高频泛音就会自然衰减，声音变得更加温暖柔和。

第二步是要让 RPM 映射到泛音的变化上，让声音产生“绽放”的效果。首先是将下方的 RPM 映射到 Partial，并设置一个合适的调制深度，达到随着 RPM 的增大，界面中的柱状体会变得越来越多，也就是泛音被唤醒的越来越多，声音会从比较闷的状态迅速转向高频的拓展的效果。其次是把 RPM 映射到 Tilt，达到在高转速时高频泛音进一步释放，产生明显的速度穿透的效果。最后是把 RPM 轻微映射到 Harmonic 中的 Parity，目的是想让声音在加速的时候会在奇次泛音和偶次泛音之间来回变化，从而产生一定的音色变化增加音色的丰富度。



图 2.12 Arturia Pigments 音乐氛围类声浪设计示例

第三步是将 Pedal 映射到声音的协和度参数上，从而唤醒声音中的撕裂感。首先是在 Harmonic 引擎中的 Inharmonicity（非协和度），它能够原本完美的倍数谐波层次向非整数调整。其次是将 Pedal 映射上 Inharmonicity，达到随着转速的增加，柱状图中的泛

音线条会变得扭曲变形，听感上从稳定的电子音乐变成了类似金属摩擦的质感，转速降低后声音又会恢复平滑，完美实现燃油汽车加速时粗糙度变化的交互感受。最后是增加调频的撕裂感，在 Window 的模块中，将 Pedal 映射到 FM 的变化上，让加速的时候多了一层锋利感。

第四步需要用效果器把这些泛音成分融合到一个空间。首先启用 Filter1，选择一个具有一定锋利度的滤波器（如 Surgeon），还可以将 RPM 映射到截止频率，把它当作第二层的高频控制开关。其次是在 FX 界面中加入 Chorus（合唱）或 Phase（相位）效果器，增加声音微弱的飘浮感。其次是加入一个 Slap Reverb（闪烁混响），调整合适的混响时间即可渲染出太空的空旷感。

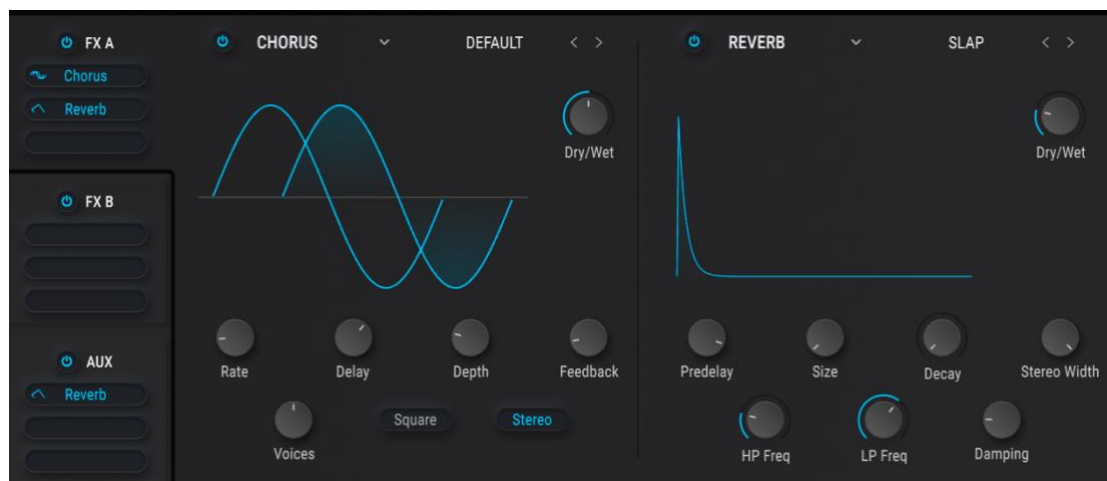


图 2.13 效果器设置

二、互动音乐驾驶

互动音乐驾驶（Interactive Music Driving）是本研究提出的一个创新性车内主动声音设计的思路，灵感来自于电子游戏中的互动交互音乐系统。在电子游戏中，音乐并不是简单地从头到尾线性播放，而是经过有意的互动处理：音乐会随着不同场景转换，是音乐随着空间作变化，也可随着战斗阶段或者天气变换，是音乐随着时间维度的变化，不论是时间维度还是空间维度，音乐转换的时候都不能有明显的中断感，需结合音乐的节拍律动与旋律和声走向做一个自然的渐变转换。

电子游戏中的音乐交互转换系统可以类比到汽车的交互系统中，汽车的交互可分为输入和输出两个大部分。输入模块为驾驶者的驾驶行为变量，直接由驾驶者触发（如踏板深度、转向角度、主动灯光），这些由驾驶者直接触发的一级变量会引发汽车动力物理

参量的二级变量的变化（如加速度、转速、扭矩等）。这些输入变量需要与音乐的不同分轨和段落关联，再通过声音交互引擎的渲染最后输出到车载的多声道扬声器系统中。其中的声音交互引擎中的关联输入变量的对应规则可以按照音乐类型的区别分为两类，第一类为歌曲类互动音乐驾驶、第二类为乐曲类互动音乐驾驶。

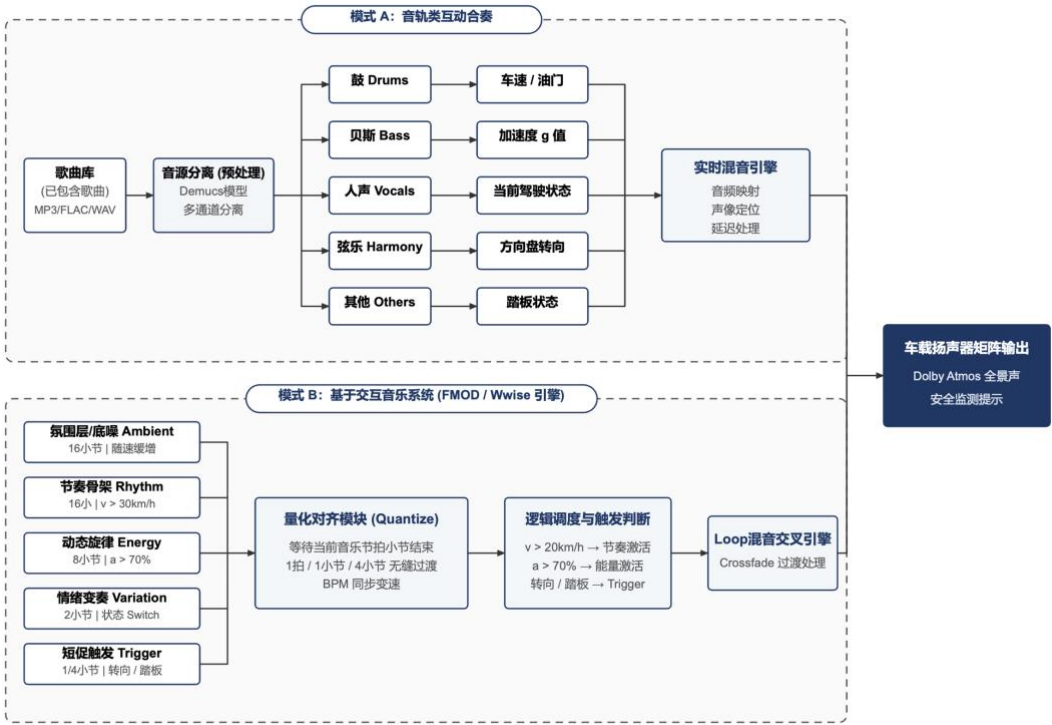


图 2.14 互动音乐驾驶交互逻辑

（一）歌曲类互动音乐驾驶

歌曲类互动音乐驾驶的基本思路是通过一个开源的音乐分轨分离模型将现有的歌曲类音乐的不同素材分轨分开，然后再把不同的分轨对应是不同的驾驶输入变量，对应时需要按照歌曲的风格与驾驶车辆以及真实的驾驶场景做合适的实时参数变化。难点就在于不同歌曲的分轨素材不一，有些歌曲的成分比较完整能够分离出完整的分轨素材，而有些歌曲成分不完整只能分离出部分的分轨素材（如只有和声类乐器，没有鼓和 Bass），所以在做对应关联的时候需要针对不同的歌曲风格做不同的对应规则，按照歌曲的分轨完整性和歌曲的风格交互性做适配，才能保证最佳的交互沉浸感。

开源的音轨分离模型算法现在已经从早期的 U-Net 架构进化到混合 Transformer 架构和扩散模型（Diffusion Models）时期了，现在主流的开源音轨分离模型有以下几种：

第一是由 Mete 开发的 HT Demucs，是目前知名度最高、综合素质最强的模型，其核心架构能同时在时域和频域之间进行处理，结合了卷积神经网络（CNN）提取局部特征和 Transformer 的长距离依赖的能力，可支持 6 声道的分离，比传统的 4 声道还多了钢琴和吉他，丰富了互动音乐的可调性。第二是 MDX-Net / Roformer，这是 UVR5 中最受欢迎的分离算法模型，其针对频域做了较大的优化。它引入了旋转位置嵌入的技术，能让它在处理人声的分离时保持更多的高频细节和歌声的音乐性处理，特别适合用在分离以人声为主的歌曲类型中。还有一些开源通用的分离模型，比如 AudioSep 和 ZeroSep 等等，这类是以自然语言为驱动模型，相对于专业的音乐分轨分离来说准确性不如上述两者。

分轨映射按照交互的强度分为强交互、中等交互和弱交互，按照交互类型可分为音量性交互和空间性交互，音量性交互负责声音的大小比例，在歌曲中的音量平衡动态的调整；空间性负责歌曲中的空间位置变化，可将分轨素材按照驾驶的联觉需求在空间中做关联交互。按照上述交互类型，鼓、贝斯等节奏类乐器属于强交互类型，关联上车速和油门踏板深度比较合适；人声作为歌曲中的主体元素交互不宜过多，需保持歌曲的整体情绪稳定，所以可定义到巡航和稳定驾驶状态；弦乐和其他类乐器可以做空间类的交互设置，让氛围类的音乐元素随着方向盘的转动而变化。驾驶时猛踩油门会有加速度的瞬时变化，这种变化会产生强烈的推背感，为了让音乐能够跟随体感的变化而变化，可以在此时让除了低频和节奏类的强交互元素之外的分轨产生随加速度变化的前后移动感，如在深踩油门（加速度瞬时为正值）时让音乐元素靠后，反之靠前。



图 2.15 歌曲类互动音乐驾驶映射模型

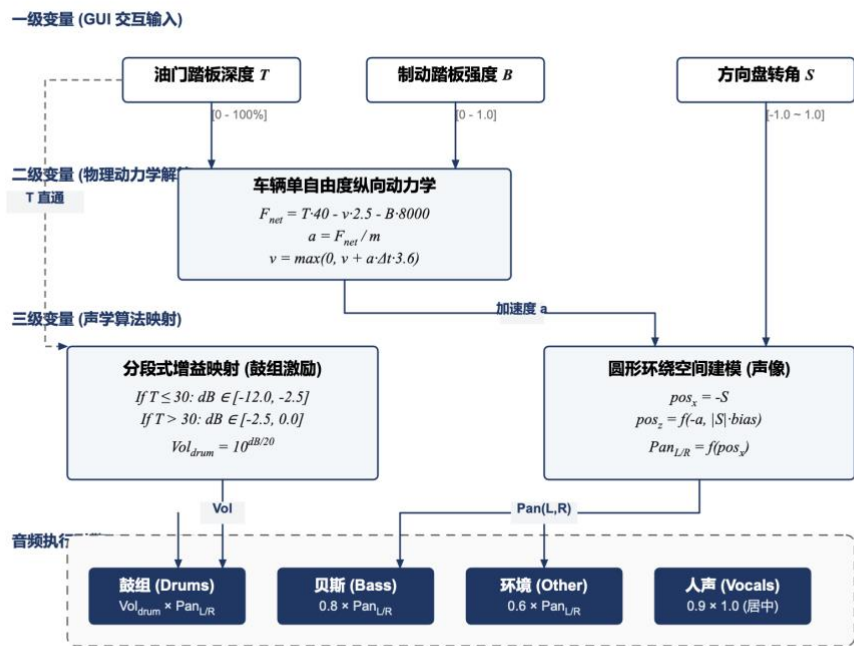


图 2.16 歌曲类互动音乐驾驶实现模型

由于歌曲类的互动音乐驾驶具有明显的模式化可循，所以可以先确定一套合理的交互规则，按照这套规则去适配每一首在线歌曲，最后在车载的落地成果可以是一个独立

的车载 APP，也可以将此功能集成到目前已有的车载音乐 APP 中，成为互动音乐驾驶模式，用户可根据需求自由选择普通听歌模式或者互动驾驶模式。本研究以 Python 为编程工具设计了一个原型实现模型可供参考，一级变量是我的交互输入信号，二级变量为车辆的物理动力模型，三级变量为声学的映射算法，最终运用到不同的乐器分轨组中。

（二）乐曲类互动音乐驾驶

乐曲类互动音乐驾驶是建立在以 Loop 循环乐句为基础上的动态变化音乐驾驶系统。与歌曲类的最大区别在于，歌曲类是以现有的歌曲为原始素材，对音乐素材进行音轨拆分再按照一定的对应逻辑做交互驾驶设计；而乐曲类的原始音乐素材并不是一个已存有的完整歌曲，而是需要从音乐的分轨开始设计，是从音乐产生的源头开始做对应设计，所以其形态会比歌曲类更具有变化性。乐曲类互动音乐驾驶的灵感来源于电子游戏中的互动交互音乐，游戏中的不同关卡或战斗阶段会对应乐曲中的不同段落，例如在探索阶段可能是一个比较舒缓的音乐，而到了战斗阶段则变为激烈的音乐，但是在变化音乐时并不会产生明显的顿挫感。原因就是这两段音乐其实具有连续性，经过特定的音乐性的处理就可以达到自然变化的效果（如具有符合和声学、可转换的调式和声结构，同时在节拍律动上能够精准地衔接上下一个段落），但这些音乐素材其实都是同一个风格的音乐，只是在音乐性的结构上做了不同的处理从而形成不同的段落与情绪变化（类似于数字音乐中的编曲过程）。

电子游戏中的互动音乐逻辑也可以类比运用到互动音乐驾驶中，首先需要确定乐曲的基本层级机构，按照纵向的变化可分为 5 层结构，每层结构按照功能性确立不同的 Loop 时长，背景层和基础层一般会持续较长的小节，而其他层可按照需求确立时长。5 个层级需要都处于同一个和声结构中，节拍也需要按照律动需求对齐，然后再按照驾驶状态安排不同的段落结构，比如在低速时乐曲只有基本层，相当于音乐中的前奏引入部分，而在高速时乐曲加入更多的层级元素，加速时增加色彩性的音乐元素提高音乐的丰富度，最后把这 5 层结构映射到不同的驾驶输入参数。

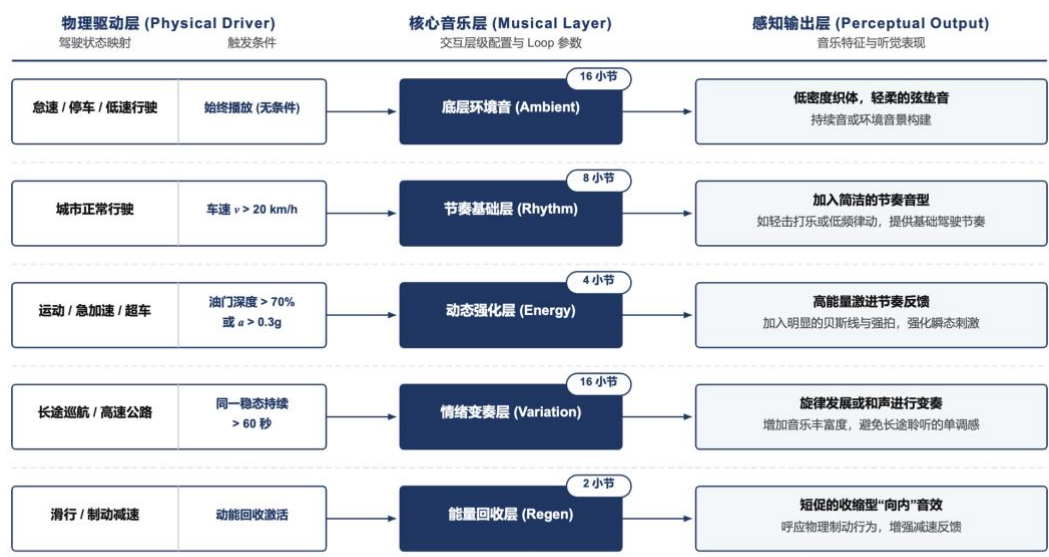


图 2.17 乐曲类层级交互逻辑映射

驾驶输入参数的映射逻辑可参考歌曲类，值得注意的是在乐曲循环结束和循环开始的节点上，不是做简单的交叉淡化，而是需要利用音乐理论让其自然地衔接。所以在需要保证乐曲段落结束与开始的节点都卡在节拍的量化节点上，让音乐在不断 Loop 循环中都能保持最自然的衔接状态。驾驶输入参数的映射不能影响到音乐的完整性和连续性，在做映射时需要考虑触发和结束触发时的启动时间和释放时间是否与音乐的律动冲突，要按照音乐的律动规律设定合理的启动和释放时间。

乐曲类互动音乐的创作需要满足一定的条件约束，首先是乐曲的每个层级的调性和声需要符合音乐听感的需求，就算是使用不同的调式对应也需要符合大众听感而不能产生不协和感；其次是不同层级的 BPM（节拍速度）需要匹配，特殊风格有节拍对位（不同配器采用不同的拍号）的需求也得符合汽车交互的逻辑，而不能产生混乱感；最后是音乐的创作形式，不能以传统的随时间的线性创作模式，而是要按照不同段落结构的需求分开创作，且要满足同一个层级创作多个素材进行顺序或者随机替换，增加乐曲的丰富度，减少长时间的听觉疲劳。

互动音乐驾驶是纯电汽车主动声音设计中具有创意性的声音设计方向，它的声音交互彻底摒弃了以模仿传统燃油车发动机噪声的设计方向，而是从交互性入手，用互动的音乐驾驶模式代替原来静态听音的模式，此时这辆车仿佛已经不是一个纯粹的交通工具，而是一个能够随着你驾驶的状态实时演奏的大型可移动乐器。

本章小结

本章围绕 AVAS 音效设计和车内主动声音设计分别展开了具体的设计思路论述：

在 AVAS 音效设计层面，本章梳理了目前国内外对 AVAS 规定的相关法规，特别是中国的 GB/T 37153-2018 法规体系进行了详细地解读。在清楚法规的基础上，提出声景融合、科幻电子、音乐氛围三种个性化 AVAS 设计思路，并根据不同的场景设计了自适应转换系统。

在车内主动声音设计方面，本章提出传统阶次合成、电子科幻合成、音乐氛围三种个性化声浪模拟设计思路，还提出了歌曲类和乐曲类两种音乐互动驾驶模式的映射和完整的设计思路方案。上述设计方案为纯电汽车的个性化主动声音设计提供了明确的方向，可针对不同的设计方案落地实施。

第三章 声音集成与模拟驾驶环境

在完成声音设计之后还需要搭建一套完整模拟驾驶系统，用来验证目前设计的个性化 AVAS 与模拟声浪以及互动音乐是否符合驾驶场景的交互需求，也为第五章主客观评价实验提供更为沉浸式的体验和稳定的运行环境。本章将从整体的系统架构开始设计模拟驾驶系统，然后再根据选定的软硬件搭建模拟驾驶环境，最后再把视觉场景和音频设计集成为一个统一的整体，按照整体设计、硬件搭配、Wwise 音频工程、UE5 虚拟场景、系统集成的逻辑展开，分别对每个子系统进行详细的论述。

第一节 系统架构

模拟驾驶的整体架构分为软件层和硬件层两个层级，整体的设计思路是软件层负责画面的渲染和声音的集成交互，而硬件层分为输入和输出，输入是模拟驾驶的各种车辆控制信息，输出是多声道的扬声器系统。系统需要达到低延时、强交互、高沉浸的目标，为第五章的主观实现搭建一个稳定的测试平台。

一、整体框架与数据流

如上述，硬件层分为输入和输出两个部分，输入层为驾驶行为参数，由力反馈方向盘和模拟踏板提供；输出层为多声道扬声器重放系统，由多线路输出声卡和沉浸式扬声器系统构成。软件层分为声音交互引擎和场景渲染引擎，由 Wwise 提供交互式的声音设计，再由 Unreal Engine 5 虚拟驾驶场景：Wwise 负责所有的音频触发交互逻辑和实时参数映射；UE5 负责把驾驶模拟场景渲染出来和车辆的动力输出系统结合，最后运用官方 Wwise Integration 工具把两者集成在一起。

模拟驾驶环境平台的数据流如图所示，硬件层是物理外设的输入和输出，驾驶者首先通过操作指令输入到控制输入系统，控制输入系统的力反馈方向盘和踏板套件负责采集驾驶的操作，最后把踏板开度、转向角度等信息传到软件层；软件层负责运算与渲染，其中 UE5 负责场景的渲染和 UI 的呈现，以及车辆动力的仿真，根据硬件的输入指令去实时地计算车速、纵向加速度、模拟转速等信息，这些信息作为因变量输出到 Wwise Integration 插件，该插件作为桥接 UE5 和 Wwise 的工具，把 UE5 的变化参量通过游戏

参数输入到 Wwise 互动声音引擎中,它是音频逻辑的运算与声音生成的核心,通过 RTPC 映射与 Switch/State 的切换和 Interactive 的调度调整完整交互声音的设计。最后把设计的输出的声音通过数字音频信号的模式输出到音频重放系统,音频重放系统由多声道有源监听系统和专业多线程 ADDA 转换器构成,用于沉浸式重放音频信号。

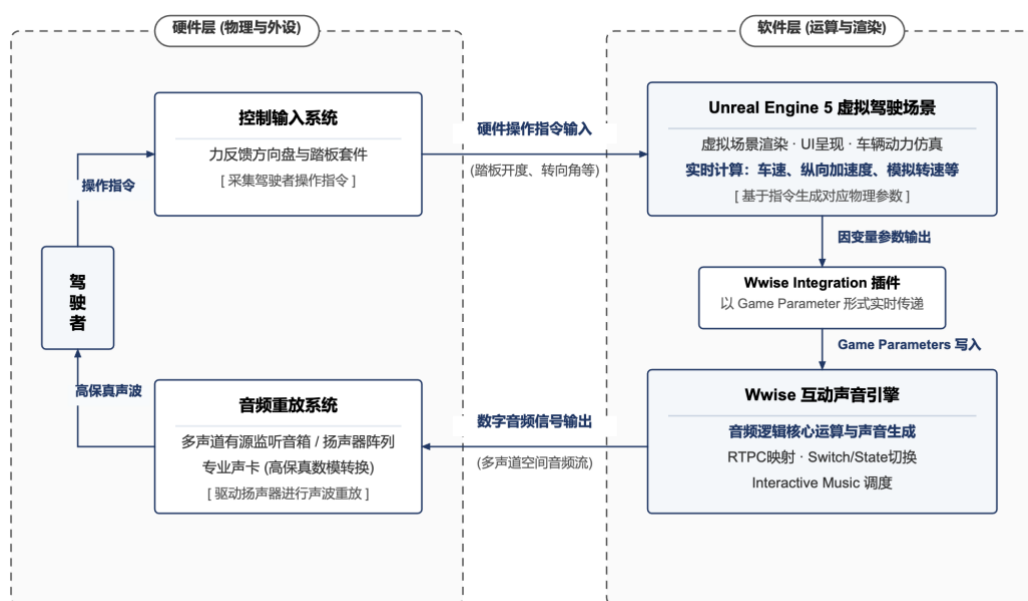


图 3.1 模拟驾驶环境平台的数据流

二、软硬件选型依据

（一）Wwise 声音引擎

Audiokinetic 公司开发的声音交互设计引擎 Wwise 是现在游戏行业和互动娱乐行业最广泛运用的互动声音设计引擎,可以支持多种不同的声音逻辑算法,并按照 RTPC 和 State 与 Switch 关联切换声音的交互状态。与其他渲染引擎自带的交互声音套件相比(如 Unreal Engine 自带的 MetaSound),Wwise 拥有更为直观的视觉性 UI 交互,在声音可视化编辑方面比其他套件更为先进,所以 Wwise 这种可视化声音编程的方式对非程序背景的声音设计师更为友好,而且可根据不同功能的界面迅速寻找到声音中存在的问题,并快速迭代。并且 Wwise 官方为了方便与其他渲染引擎集成,还推出了针对不同引擎的集成插件工具,如 Wwise Integration for Unreal 插件,它可以结合 UE5 蓝图节点编辑的方式与其无缝连接与集成,实现高效率的工作模式,提高工程的稳定性与可调整性。

因此，本研究最终选定使用 Wwise 2024 作为音频交互引擎。

（二）Unreal Engine 5 渲染引擎

Unreal Engine 5(以下简称 UE5)以其出色的场景渲染能力和蓝图可视化脚本编辑，成为目前最主流的游戏和影视渲染互动引擎。对于本研究而言，UE5 内置的 Chaos 载具物理系统可对车辆的悬挂、轮胎摩擦、扭矩等实时物理参数进行高精度的模拟，还能够不依赖第三方载具的条件下实现基础的驾驶力学模拟，鉴于此系统可快速搭建模拟驾驶的车辆动力系统的调整。同时 UE5 的 Fab 资源商店有庞大的场景资源库可供选择和下载，所以可通过这些资源快速地构建出驾驶场景的模拟系统。由于本研究主要是对声音品质的评价，对场景的细节还原与渲染需求适中，可快速通过以上方法搭建出可运行的场景系统。基于此，本研究决定使用 UE5.6，并使用 Wwise Integration for Unreal 插件实现声音的集成工作。

（三）控制输入硬件

本研究选用 Logitech G29 力反馈方向盘与三踏板套件。该设备具有正负 450 度的可旋转范围，拥有接近真实方向电机转向手感，而且还有稳定的官方设备管理调节驱动软件；内置的力反馈电机可在蓝图逻辑配合下模拟路感与转向阻力；踏板组件通过 USB HID 协议与计算主机进行数据交流而无需额外的软件驱动，并且该设备与 UE5 的 Enhanced Input 系统连接稳定，兼容性良好。

（四）音频重放硬件

本研究选择的音频重放环境是在一个专业的多声道录音棚，录音棚配备完整的 7.1.4 沉浸式多声道扬声器系统，采用的是真力（Genelec）的有源监听音箱，可在空间中精准的还原声音的定位，录音棚还配有真力配套的 Genelec GLM 校准系统，可对每一个声道进行精准的声压级补偿和频率校准，确保最佳听音区的声音效果。本研究选用该录音棚主要有以下几点原因：首先是 7.1.4 的多声道扬声器系统可高度还原出真实的听音场景，不仅仅是前方声场，整个录音棚可在三维空间中自由的定位声音位置，具有高度沉浸的听音体验；其次是录音棚已经做了相关的声学处理，其在吸声、扩散与隔音的处理已经足够满足本研究的检验标准，不需要再去重新按照声评实验室的需求设计一个新的实验室，节约了大量时间；最后是因为录音棚内已经构建好了 Dante 网络音频系统，实验者只需带上安装有 Wwise 和 UE5 平台的个人电脑，即可通过 Dante 系统直接接入到

录音棚的扬声器，不需要再进行复杂的硬件路由和重放链路的搭建。

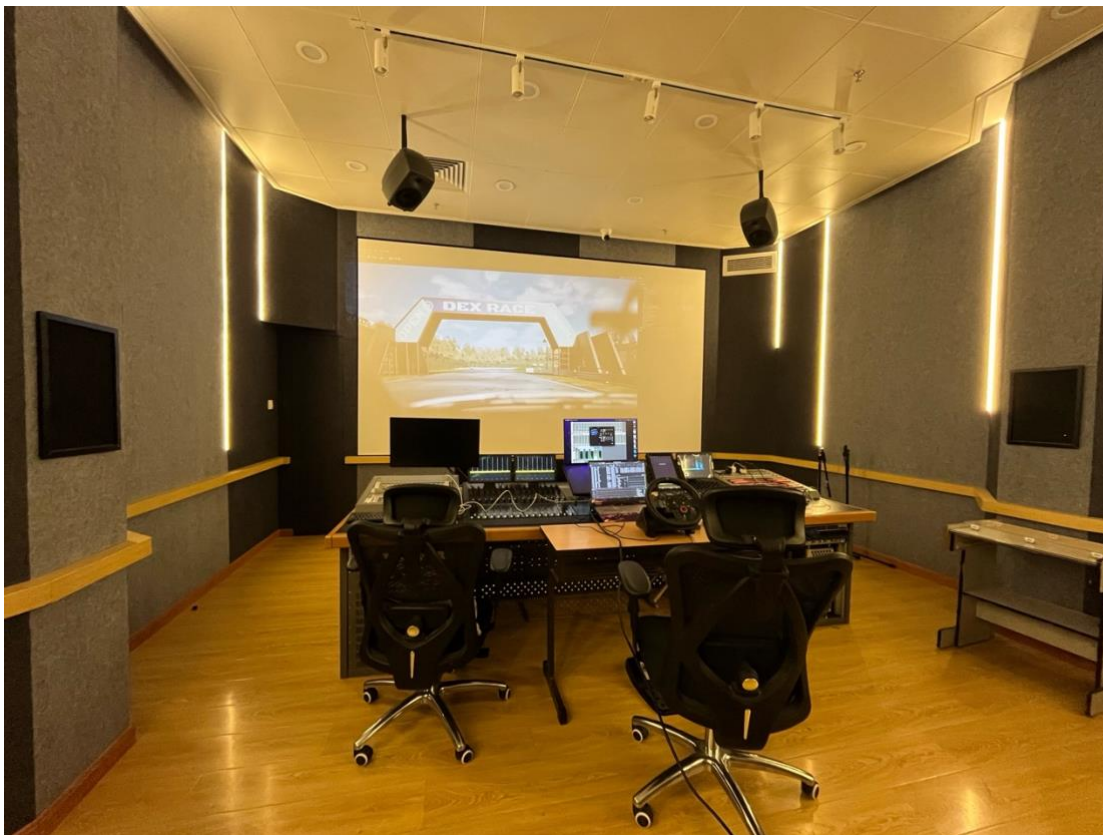


图 3.2 音频重放录音棚硬件环境

第二节 硬件系统搭建

一、控制输入系统

控制输入系统的主要任务是将驾驶者的前端输入操作（如踩踏板、转方向盘）转化为数字信号提供给 UE5 的车辆动力模型。G29 的力反馈方向盘和踏板套件通过 USB 接口连接至电脑，再由 UE5 工程中的 Enhanced Input 系统完成设备的映射。具体可分为以下几个步骤，首先是在操作系统中安装 Logitech G Hub 驱动，启动驱动软件并尝试扫描设备，如果设备没有成功扫描请检查外部接口的连接是否稳定；其次是打开 UE5 的设置，在设置中将方向盘轴、油门轴、制动轴分别绑定至对应的 Input Axis 映射，还需要配置死角区，将方向盘的死区设置为上下 3%并与灵敏度实现线性的映射。

经过上述配置后，三路控制信号的输出形式如下：方向盘转角信号在经过死区处理与线性映射后输出至-450 度至+450 度区间，正值表示右转，负值表示左转；油门踏板开度信号归一化至 0 至 100 区间，0 表示完全释放，100 表示完全踩下；制动踏板深度信号归一化至 0 至 100 区间，规则与油门相同。上述三路信号在 UE5 的 Event Tick 事件中每帧读取，作为车辆动力模型的自变量输入。

力反馈系统通过 Logitech SDK 与 UE5 蓝图联合配置。在急加速（油门开度大于 80%）与急制动（制动深度大于 70%）工况下，蓝图触发方向盘的振动力反馈，模拟路面冲击感以增强驾驶沉浸度。力反馈强度参数需在平台调试阶段通过多次试驾进行人工标定，确保触觉反馈不对声音感知产生干扰性影响。

二、音频重放系统

由于录音棚内建有基于 Dante 协议的数字音频网络，全部的音频设备都通过 Dante Controller 集中管理路由，外部设备只需要下载 Dante Virtual Soundcard (DVS)，按照正确的路由顺序即可连接上录音棚的多声道扬声器系统，具有的步骤如下：

首先需要安装 DVS 并配置参数，将 Audio Channels 规模设置到与扬声器系统匹配的规格，7.1.4 重放系统对应 12 个通道，所以选择 16×16 的通道规格，延迟需要设置到合理的范围，并在 Network Interface 一栏选择连接至录音棚交换机的有线网口，此时 DVS 将作为一个 16 入 16 出的 Dante 节点出现在棚内 Dante 网络中。其次是在 Dante Controller 中完成通道路由，打开棚内工作站或实验电脑上的 Dante Controller，在路由矩阵中将实验电脑 DVS 的前 12 路输出(DVS Output 1 至 12)分别订阅至录音棚 MTRX 的输入通道 51 至 62，从而将实验电脑输出的 12 路音频信号送入棚内监听系统的对应通道，驱动 7.1.4 扬声器阵列重放。然后是配置系统音频输出与声道布局，在系统音频设置中将音频输出设备切换为 Dante Virtual Soundcard，随后打开系统中音频设置，选中 DVS 设备，将其输出格式设置为 7.1.4，这样能让 Wwise 能够将空间音频信号按 7.1.4 的声道顺序输出至 DVS 对应通道，再经 Dante 网络路由至 MTRX 的输入端。最后是处理网络优先级冲突，实验电脑通过有线网口接入录音棚 Dante 交换机后，由于有线与无线网络的优先级问题，电脑会尝试通过 Dante 交换机访问互联网，导致互联网连接失败，只需要在网络设置中把无线网络的优先级调整到 Dante 网络之前即可解决。

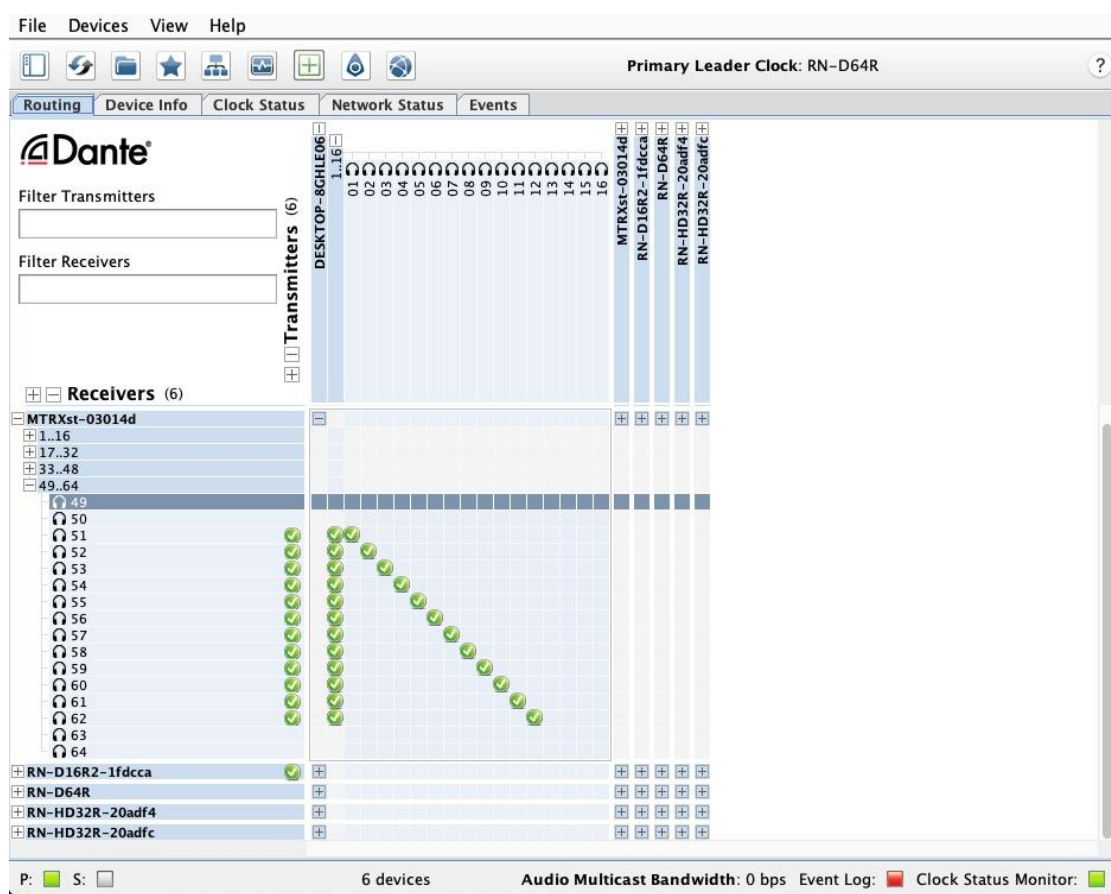


图 3.3 Dante 协议的数字音频网络连接

第三节 Wwise 音频工程搭建

一、工程结构与资源组织

Wwise 工程结构与资源的组织对之后声音的开发与集成至关重要，好的资源线路管理可以减少很多由于线路不清晰而导致的错误。本研究按照声音互动类型分类，分类声效模块和互动音乐模块：声效模块是用来管理如 AVAS 音效和模拟声浪等声音效果类，在 Wwise 层级中放在 Actor-Mixer Hierarchy 下进行组织；互动音乐模块是用来管理和放置互动音乐驾驶的音轨内容，互动音乐内容置于 Interactive Music Hierarchy 下进行组织。

声效模块（Actor-Mixer Hierarchy）的默认工作单元中下置两个 Actor-Mixer，分别为 AVAS_Container 与 Engine_Container。AVAS_Container 中建立一个 Switch Container

用来适配自定义转换系统，在该 Switch 容器下需要建立三种风格 AVAS 音效的 Blend Containe (Music/SciFi/Soundscape)，这三种风格容器下分别导入在 DAW 中设计好的 AVAS 音效分层，不同风格的 AVAS 音效可以有不同的分轨分层，导入为 SFX (声效对象)。同理 Engine_Container 内含三种风格的模拟声浪，每种风格使用 Blend Container 将多个音频层进行参数化混合，不过与 AVAS 需要自适应转换不同，模拟声浪为手动 UI 切换触发，所以不需要先设置 Switch 对应三种风格音效，只需要先把声音导入到各自风格的 Blend Containe 中，然后设置对应的播放该内容的 Event 事件即可。

互动音乐模块(Interactive Music Hierarchy)下构建了一套基于 Wwise Music Switch Container 的互动音乐系统,可以实现不同段落结构之间按照设定的转换状态触发音乐的段落改变。所以可以根据两种互动音乐模式分别建立各自的音乐转换容器,然后在此之下设立不同风格的 Music Playlist Container (Style_A/Style_B), 不同风格播放列表容器下会有建立音乐分轨的 Music Segment, 最后在此之下才会有放置不同分轨的 Music Track (鼓、Bass、人声等), 在 Music Track 中会有不同的 Layer 为同一个乐器的不同变体, 会按照设定的随机播放或顺序播放自动跳转到应该对应的 Layer 中。各种乐器的 Track 还需要与 Game Parameters 中的车辆驾驶参数进行 RTPC 关联, 本研究在 Wwise 工程中定义的核心 Game Parameters 涵盖车辆行驶速度 Speed, 范围 0 至 200 km/h; 模拟发动机转速 RPM, 范围 0 至 8000 r/min; 油门踏板开度 Throttle, 范围 0 至 100%; 制动踏板深度 Brake, 范围 0 至 100%; 纵向加速度 Accel, 范围-10 至 10 m/s²; 方向盘转角 SteerAngle, 范围-450 度至 450 度等多个维度。

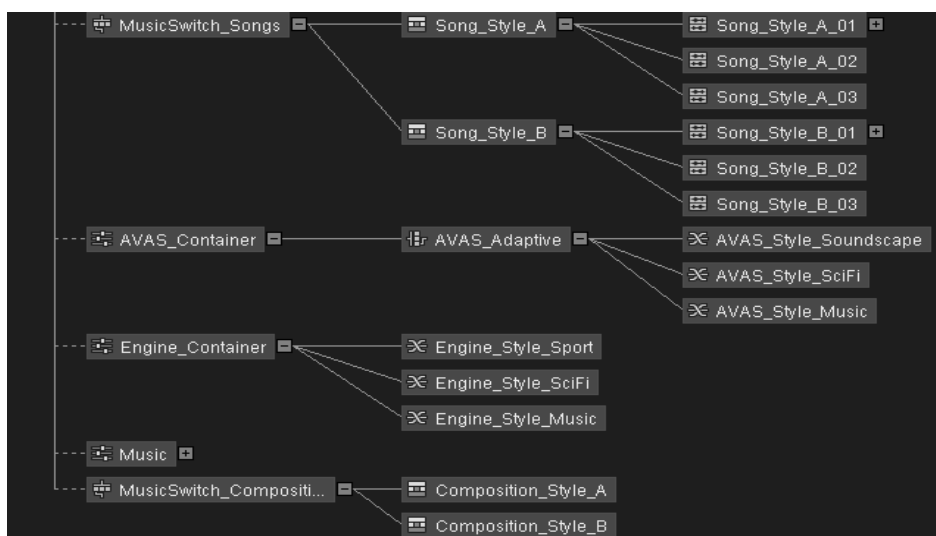


图 3.4 Project Explorer 中 Audio 分层级

除了基本的 Project Explorer 中 Audio 的分层级之外,要实现复杂的声音交互还需要设置关于交互相关的转换或者动态参数变化的逻辑参数结构。首先是 Game Syncs 中 States 状态的设定,按照需求可以分为两个 State Group,第一个状态组定义为驾驶模式的状态转换组 DriveMode,下设两个互动音乐驾驶模式的状态;第二个状态组定义为随车速变化的状态转变 SpeedState,下设三个速度阶段,当车速到达某个选定阶段时切换为当前车速阶段的 State。其次是 Switch 转换的设定,按照层级可分为 EngineStyle 和 StyleSwitch 两个 Switch Group,声浪转换组中下置三种声浪风格的转换,而风格转换容器则是用以转换不同音乐风格的 Music Playlist Container。Event 事件的设计需要结合到具体的播放场景,按照模拟场景的需求可设定两个 Event 事件类,第一类为模拟声浪触发的 Event 组,第二个为互动音乐的 Event 组,两组下方先是设置播放该类型的播放事件,其次是设置选择播放哪个的 Set 事件,还需要单独设置一个停止播放事件,这样就形成了一个播放事件逻辑的完美闭环。

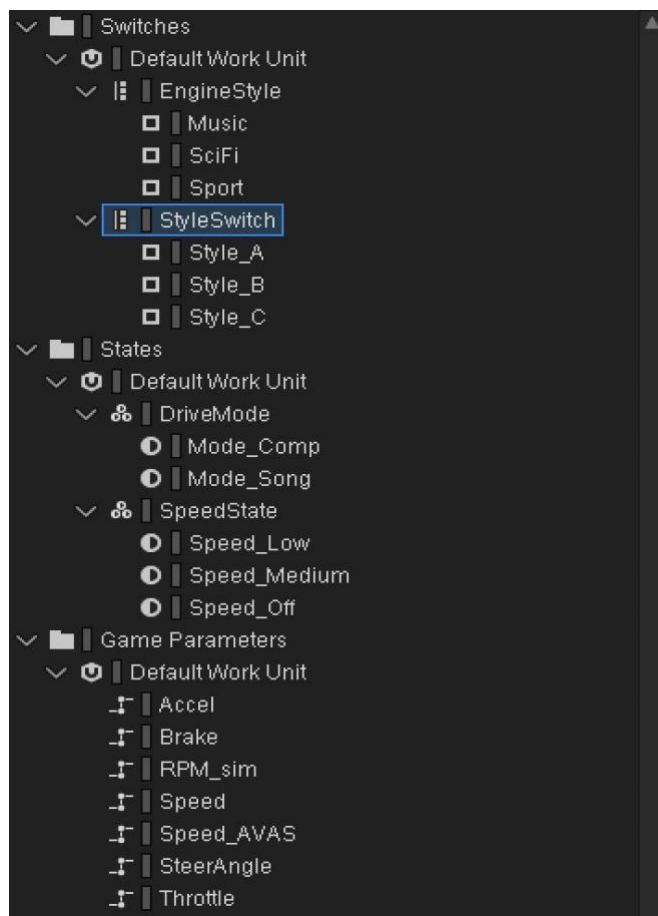


图 3.5 Wwise 转换动态参数变化逻辑参数结构

命名规则方面，随着系统声音样本的增加，工程交付的难度也在变大，一套统一的 Wwise 对象命名规范非常重要，可有效提高工程的可读性和后续维护的效率。参考游戏音频的素材命名，可以将音频文件以“类型_风格_变体”编号格式命名，例如在 AVAS 容器中则为 AVAS_StyleA_Low_01，而容器对象则以“功能_层级”的格式命名，事件名以“动作_对象”格式命名，Game Parameter 的命名可以直接采用英文拼写，如 Speed、Throttle。确定一套统一的命名规范可以大幅提高多人协作与工程迭代的沟通效率，减少因为命名混乱而导致的系统错误。



图 3.6 Wwise 工程结构与资源组织

二、互动逻辑设计

声音互动逻辑的设计需要考虑车辆在模拟环境中的各种参数变化，比如车速的不同行驶工况和驾驶状态的变化。本研究的互动逻辑可按照 AVAS 自适应切换逻辑、模拟声浪动态调制逻辑、互动音乐调度逻辑来分。

(一) AVAS 自适应切换逻辑

AVAS 音效的互动逻辑是由车速定义的不同状态机来驱动，使用的是 Wwise 的强大

的离散实时转换的状态变化系统，并且还需要与 RTPC 配合实现转台内部的连续参数变化。按照法规（UNECE R138）的要求和声音设计的方案，需要将 AVAS 的工作速度范围分为三个区间，分别为 0-20km/h 的低速区、20-30km/h 的中速区和高于 30km/h 的临界关闭区，这三个车速变化区分别对应刚才设计的三个速度状态变化，低速区对应 Speed_Low 状态，中速区对应 Speed_Medium 状态，高速临界区则对应 Speed_Off 状态，最后由 UE5 的蓝图根据当前车速实时地写入到 Wwise 的 SpeedState 状态组里面。最终的效果呈现为：当车辆被唤起但处于静止状态时触发 Play_AVAS 事件，此时状态机自动切换到 Speed_Low 的状态并播放对应风格的 AVAS 音效；当车速到达 20-30km/h 区间，状态切换为 Speed_Medium，根据自适应系统的转变规则，声音并不是瞬时改变而是经历了一个长时的渐变才转为当前状态的声音（约为 200ms）；当车速超过 30km/h 时切换为 Speed_Off 状态，AVAS 音效经过渐变系统自动停止播放。在各个速度区间的内部还需要与 RTPC 参数进一步做映射，音调（Pitch）与音量（Volume）等参量关联上不同的驾驶参数进行曲线微调，这样声音就可以实现随着驾驶参数的变化而动态变化，符合法规中对声音移频的规定。当然，为了应对模拟场景中的倒车场景，还需要针对 R 档设计倒车的专属 AVAS 变体，首先通过蓝图检测到当前车辆为倒车状态，然后把状态转换为 Reverse_AVAS 状态组触发具有警示性的倒车 AVAS 音效警报。

（二）模拟声浪动态调制逻辑

模拟声浪相较于 AVAS 来说，是电动汽车主动发声系统中对驾驶员直观听感最明显的声音设计类型，它的动态调制逻辑需要参考燃油发动机的动态发声机制，燃油机是通过负载的输入引起转速的变化，声音随着负载的瞬时变化与转速的响应而动态变化，所以模拟声浪的调制逻辑也需要符合这个基础的声音响应逻辑链条。在 Wwise 工程中已经分别建立了三种声浪风格的 AVAS 设计，放在不同的 Blend Container 结构中，在 Blend Container 的不同声音对象是声音音效分层，如基础频率层、中频谐波层、高频纹理层、瞬发动态层等。Blend Track 根据各层级的混合权重和 RPM 参数的变化动态调整，并随着转速的升高谐波成分增强。

UE5 中的转速（RPM）并不是直接对应真实的电机转速，而是通过车速与加速度经过一定的函数映射关系计算出来的“模拟转速”，其计算公式如下：

$$RPM_{sim} = RPM_{idle} + Speed \times k_1 + Throttle \times k_2 + \max(Accel, 0) \times k_3$$

其中, RPM_{idle} 为怠速基准值, 本研究选取为 800 r/min, 车速、油门开度与正向加速度的权重系数分别对应 k_1 、 k_2 、 k_3 , 这些权重系数需要针对不同的声浪类型风格独立的调整, 做到差异化的模拟转速调制: 首先是运动感声浪, 可以把 k_2 、 k_3 赋值更高用来呈现油门更加灵敏的特性, 这样在加速时转速会爬升得更快更剧烈, 运动感更强。其次是电子科幻感声浪, 可以增加 k_1 让其成为主权重, 这样转速变化更为平滑, 模拟出电子飞船的驾驶感。最后是音乐类声浪, 可以在高转速区间增加一定的非线性音色层, 强调音乐的协和性。

在驾驶场景切换中, 需要有 Transition Time 与 Cross-fade 曲线控制 Blend Container 的过渡行为: 如在急加速时短时间内转速会提高到较高的值, 此时声浪会快速过渡到高转速时的声音状态; 而松开油门时, 转速则会缓慢地回落到怠速中, 声浪的状态也会变为平缓, 由此模拟出真实发动机的减速惯性。

(三) 互动音乐调度逻辑

互动音乐模式定义在 Wwise 的 Interactive Music Hierarchy 层级中, 所以可以利用 Wwise 强大的互动音乐交互功能实现音乐驾驶的设计。首先是在 Music Switch Container 的顶层调度单元中定义当前转换音乐的 Switch 变量, 变量来源于上述建立的 DrivingMode 的 Switch 转换组, 能够在两种音乐互动驾驶模式(歌曲类、乐曲类)之间切换。其中每一种模式中包含有一个 Music Playlist Container, 在此可在 Music Segment 中设定特定的播放逻辑, 比如让哪部分音乐段落先播放哪部分重复播放等, 从而形成一个完成的互动形式交互播放模式。在每个 Segment 内部使用多轨 Music Track, 其中的每个乐器轨道的音量、频率、声像等按照上一章的互动音乐驾驶设计的要求进行 RTPC 匹配与映射, 动态地控制每个音乐元素在驾驶工况中的混音比例, 从而实现与驾驶行为强关联的动态混音系统。

两种模式在切换时, 根据预设的 Exit Cue 点在 Music Switch Container 中, 当前的音乐小节结束时自然地衔接上新模式的引入片段, 所以需要量化到音乐的速度与节拍,

对应上 Wwise 视图中的节拍线，避免因切换点位置对应错误而导致节拍的混乱。与此同时，切换时也应该设计一定时长的小节长度，在此小节时长中，两种模式的音频将进行淡入和淡出，以此来保证过渡的流畅性体验。

三、RTPC 控制与参数调节

Wwise 中实现连续参数驱动声音动态调整的是 RTPC(Real-Time Parameter Control) 的核心机制，Wwise 中定义的 Game Parameter 可以任意关联上不同的音频对象，按照自定义的映射曲线对声音的音量、音调、高低通滤波处理等。总体的 RTPC 映射思路如下图 3.7:



图 3.7 总体 RTPC 调整逻辑

在具体的曲线调整策略上, AVAS 的速度可以单独地设定一个 Speed_AVAS 的 Game Parameter, 取值区间在 0-30km/h 之间, 用来关联用于 AVAS 设计的车速, 可避免采用

全速区间导致 RTPC 曲线需要极速拉低的问题。首先是 AVAS 音乐氛围类的 RTPC 映射，根据第三章中的设计思路，首先基础根音层的，需要一直保持在声音的持续过程中，但是当和弦层和旋律层出现之后，基础层应该避让一定的音量空间。和弦层出现在车速到达 5km/h 时按照 Exponential (Base1.41) 的曲线映射到 10km/h 时为 0dB。同理当旋律层出现时是在 12.5km/h 按照同样的曲线到 20km/h。

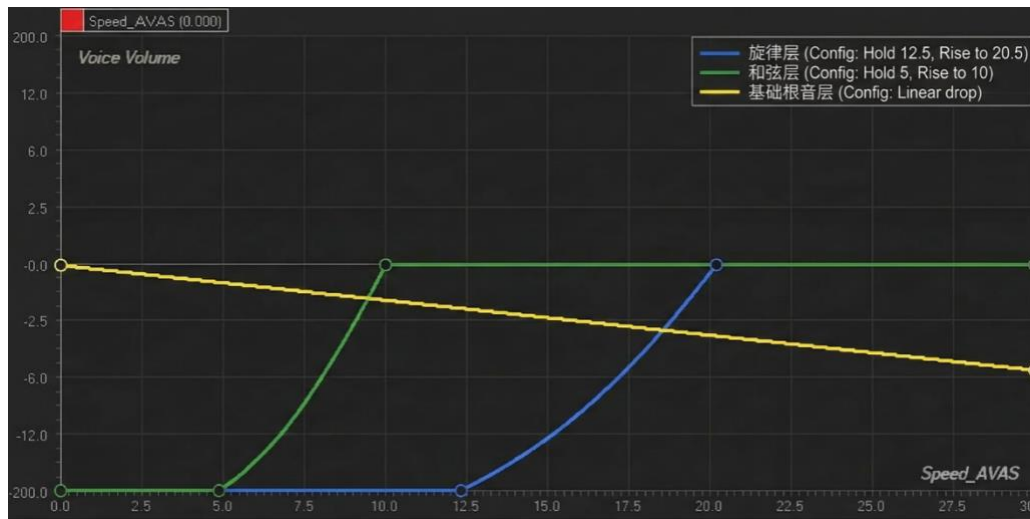


图 3.8 AVAS 音乐氛围类的 RTPC 映射

音乐氛围类的模拟声浪 RTPC 调整不能和其他音效类的一样，按照第三章的设计要求，音乐类需要按照调性增加层次，选定好音阶之后映射 RTPC 可以把全速度分为多个速度区间，然后按照各个速度区间做一个平缓的渐变，减少因为突变产生的不适感。在关联油门深度参数时还需要考虑启动和释放时间的设置，音乐类忌讳过于敏感的快启动。



图 3.9 音乐氛围类的模拟声浪 RTPC 调整

互动音乐驾驶与模拟声浪不一样的地方在于转向角度的 PTPC 映射，声浪中并没有针对转向角度的关联量，而互动音乐中的和声层（如弦乐、钢琴等）不能与油门强关联，因为这些乐器并不是瞬时触发，所以关联上声像变化会更加符合直观审美。所以当转向角度为 0 时，此时并不触发该层级，存在一定的转向角时加入和声层并产生声像变换，声像并不是和转向角保持相同的方向，而是和横向加速度保持相同的向量，目的是为了模拟转向时体感左右的晃动所带来的音乐互动。

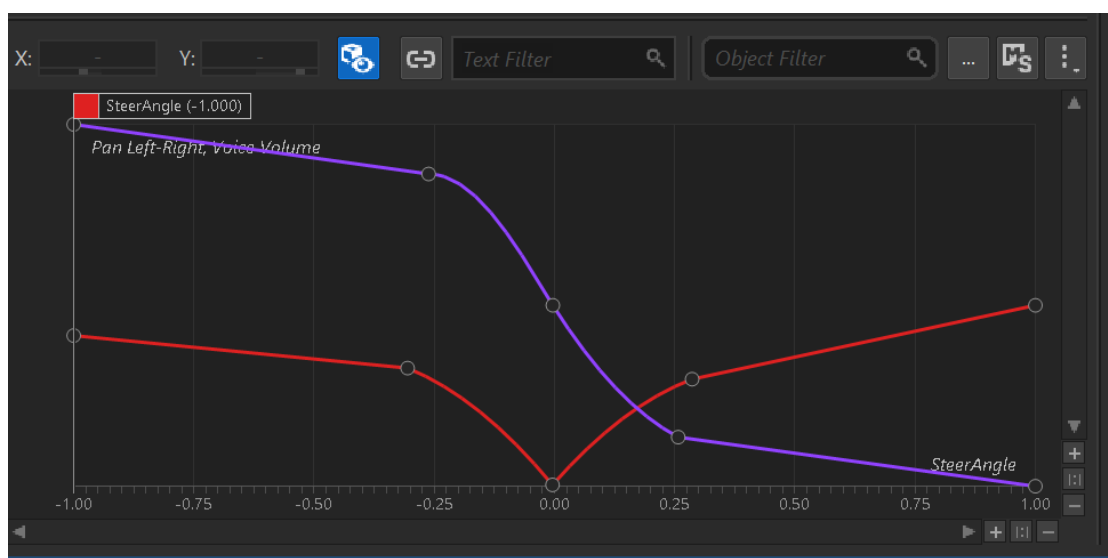


图 3.10 互动音乐驾驶和声层 RTPC 调整

最后所有的 RTPC 映射曲线均用 Wwise Profiler 进行实时监测与调试，远程连接上 UE5 的车辆动力模型和场景变量进行真实的驾驶场景测试，保持直觉听感与声音交互逻辑对应，并观察是否有异常的声音对象并没有按照设定播放。

第四节 Unreal Engine 虚拟场景搭建

一、驾驶场景设计

（一）道路场景

为了能够兼顾开发进度和实验的有效性，本研究并不会从建模阶段开始构建驾驶场景，而是通过 UE5 的官方 Fab 资源商城中寻找能够用来构建场景的资源。浏览 Fab 商

城后选定 Road Creator Pro 道路生成插件作为本研究道路场景的搭建工具，该插件具有强大的样条线工作流（Spline）非常适合快速地生成高精度的道路网络。下载完成之后首先需要将该插件的核心道路蓝图拖入现在的关卡场景中；其次是利用它的延伸样条线的功能，在道路末端拖动坐标轴即可延长成新的道路结构，通过这么不断的拖动新的道路和调整延伸点就可以快速的勾画出测试道路的轨迹。但是此时只是把道路放在了场景中，并没有适应地形，所以还需要在细节中开启地形变形的选项，插件就会自动地将 Landscape 抬升至与路面贴合，这样就节省了大量手动贴合地面的工作。目前道路中虽然已经默认使用了高质量的沥青材质，但是依然可以在道路灵活度中设置合适的数值，可轻松地增加地面的裂缝、磨损、湿滑等更加真实的道路材质，增加模拟场景的真实度。该插件还支持附属设施自动生成的功能，勾选该功能即可自动生成适配该道路的路灯、护栏、草丛、树林等道路设施，为驾驶体验增加了丰富的视觉元素。

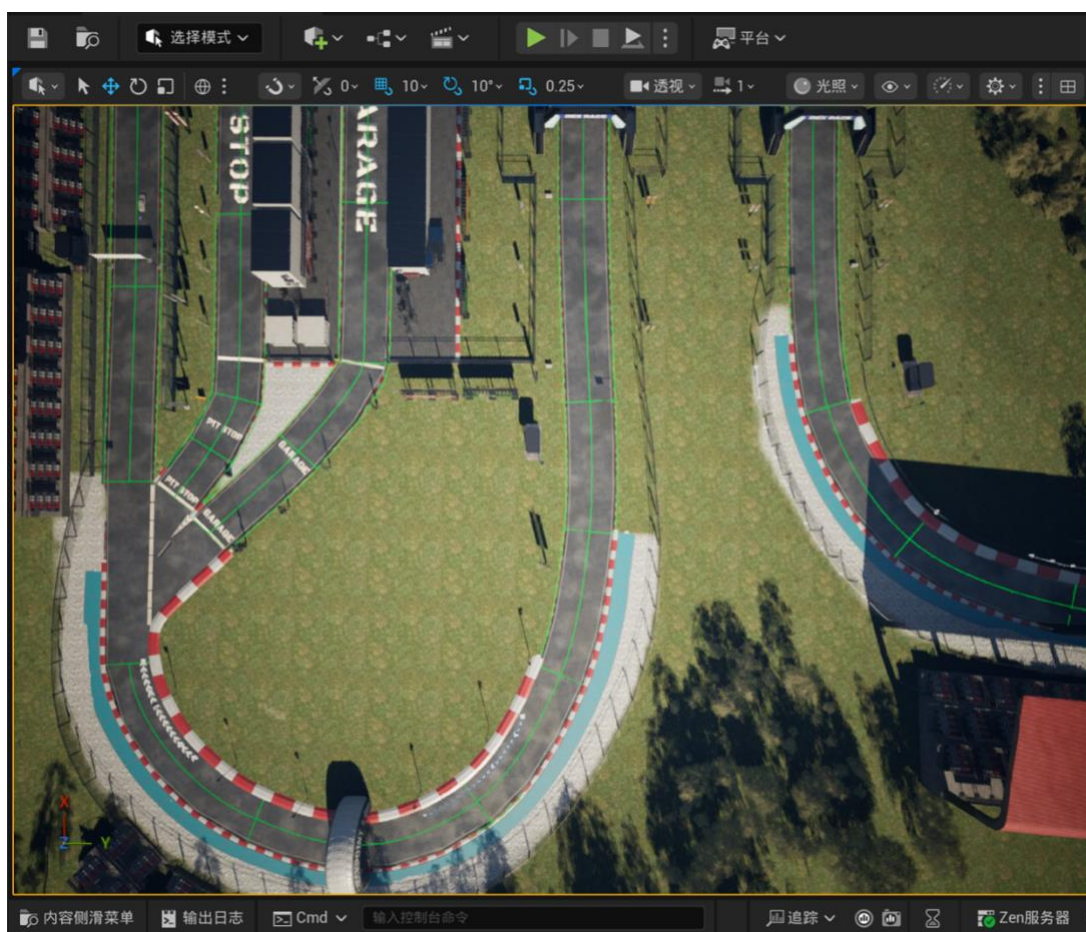


图 3.11 UE5 道路场景

除了道路场景之外，现在的场景中还是漆黑一片，还缺少点亮场景的主光源和天气系统，在 UE5 中的环境光照混合器里可快速地构建基本的光照和天气系统，分别打开定向光源、大气天空、环境光、指数高度雾、体积云这五个参数，在按照光照需求修改光源的强度和角度，实现更加真实的模拟效果。

（二）UI 交互界面

为了快速地验证声音交互，UI 设计最直接的方法是使用 UMG (Unreal Motion Graphics) 结合 Widget Switcher (控件切换器) 的方案。采用此方案是因为不想让整个屏幕都显示复杂的 UI 界面，而是让 Widget Switcher 来隐藏和显示我需要控制的按钮：一级界面为 AVAS 和主动声音两个选项；二级界面为各种对应的风格类型；三级界面才是选择到具体的声音类型。按照此逻辑，首先需要在用户界面中添加控制蓝图(Widget Blueprint)，随后打开此蓝图，在左侧的控制版中拖入一个画布面板，在画布中拖入主角 Widget Switcher 并调整大小，让它占据到预期的屏幕大小。之后就是构建底层的面板，需要在空间切换器中拖入五个画布，它们会自动成为转换的子选项，按照上述的三层 UI 结构配置 Index。在搭建好基本的视觉结构后需要按照设想的跳转选项，该功能主要靠 Widget Switcher 实现，需要在设计好的按钮旁添加切换节点，分别对应 Index 的 0-4 即可实现理想的 UI 交互效果。最后则是将 UI 添加到驾驶场景，只需要打开车辆蓝图，在游戏开始之后添加 Create Widget 节点，然后把创建的控件蓝图连接上，再引出 Return Value 让 UI 显示出来，为了能够让鼠标点击 UI 界面，最后还需要添加 Set Show Mouse Cursor (设为 True) 以及 Set Input Mode Game and UI 节点，让 Player Controller 连接到目标引脚即可完成设计。

二、车辆动力模拟

（一）驾驶行为自变量

车辆动力模型的输入自变量由 G29 外设的三路套件提供，分别为油门踏板开度 (Throttle, 0 至 100%)，制动踏板深度 (Brake, 0 至 100%) 与方向盘转角 (SteerAngle, -450 度至+450 度)，其信号采集与格式化处理详见上述关于硬件输入的描述。

（二）车辆信息因变量

由驾驶者通过驾驶自变量输入之后，车辆动力模型应该按照还原真实驾驶车辆物理

特性的原则，输出随驾驶参数改变的自变量，该变量为车辆车速（Speed）、模拟转速（RPM_sim）、纵向加速度（Accel）等参量。模拟转速的映射公式已经在模拟声浪动态调制中列出，在虚幻引擎的 Chaos 载具系统中，加速度是连接踏板输入力和最终车速的中间量，其真实的动力学计算是由力来决定，加速度由车辆受到的合外力来决定，根据牛顿第二定律，瞬时的加速度公式为：

$$a(t) = \frac{F_{drive}(t) - F_{brake}(t) - F_{drag}(t) - F_{roll}}{m}$$

其中 $F_{drive}(t)$ 为驱动力，由油门踏板深度决定， $F_{brake}(t)$ 为制动力，由制动踏板深度决定，而 $F_{drag}(t)$ 与 F_{roll} 代表空气阻力和滚动阻力， m 为车辆的总质量。与现实不同，在游戏引擎中时间被分为一帧一帧的离散 Tick，所以蓝图中提取加速度其实最快的方式是对速度求时间导数，离散时间下的平均加速度的近似公式为：

$$a = \frac{dv}{dt} \approx \frac{v_{current} - v_{previous}}{\Delta t}$$

- $v_{current}$ ：当前帧的车速
- $v_{previous}$ ：上一帧的车速
- Δt ：两帧之间的时间间隔（虚幻引擎中的 Event Tick 输出的 Delta Seconds）

其实油门和制动踏板深度并不直接映射为车速，踏板控制的是引擎输出的扭矩和制动力，车速是通过这些力经过质量除法算出加速度后随着时间积分的结果。在 UE5 中，模拟器会在每一帧之后，计算加速度的时间积分并更新当前的真实车速，计算公式为：

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(\tau) d\tau$$

- v_0 ：初始速度
- t ：当前时间
- $d\tau$ ：时间步长（Delta Time）

通过上述的物理转换模型，可实现从驾驶输入参数的自变量从而引发车辆的物理信息因变量的变化，模拟出真实的汽车驾驶动力模型。上述是转换的原理，但其实在 UE5

中不需要自己动手写对应函数映射，蓝图中的 Event Tick 中可以按照模拟结果实时触发参数供其调用，而在载具运动组件（Vehicle Movement Component）中已经按照映射关系正确的编码好了组件，可在蓝图编辑器中牵引出需要使用的变量。

（三）载具物理参数定制

UE5 的 Chaos 在距物理系统中内置了动力模型，但为了适配纯电汽车的运动特性，还需要在以下几个参数中做定制化的调整：首先为了模拟出电车的大扭矩特点，需要将最大扭矩设置为 $450 \text{ N} \cdot \text{m}$ ；其次是模拟电车在起步后的平坦扭矩输出，所以要把扭矩衰减斜率设置为极小值；然后为了接近电机的直驱水平，传动效率也要根据需求设定为 0.97；最后要模仿单踏板能量回收带来的减速感，需要将最大制动减速度设置为 0.9 g 。

按照上述的修改内容，可直接利用 UE5 中的 Chaos Vehicle 物理框架，编译器打开该组件，通过继承 AWheeledVehiclePawn 基类产生电动车专用的 Pawn 类，还在构造函数中对引擎和变速箱参数进行了定制化的配置，Uchaos WheeledVehicleMovement Component 中将引擎的最大扭矩定值为 $450 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，TorqueRolloff（扭矩斜率）设为 0.05，单一的固化齿轮比档位（GearCount=1）等参数调整，实现真实的电车驾驶动力模型的建构。上述参数组合可还原出电车在真实驾驶中的即时响应与无顿挫的传动特性。

（四）蓝图代码实现

为了能够让 UE5 输出的动力参数精准被 Wwise 的游戏参数识别并对应成功，需要将总引擎中的数据源引出，然后每一帧实时地发送给 Wwise，具体的实现步骤如下：

第一步是把数据从引擎中引出来，首先打开车辆的蓝图编辑器，在空白处搜索并添加 Event Tick 节点，它能够把每一帧的驱动数据发送出去；其次是在载具运动组件放入蓝图中，然后加载一个 Self 用来定义目标为此辆车。第二步是把载具运动组件牵引出需要使用的车辆动力学参数，本研究需要添加三个节点：首先是速度（Speed）节点，在引脚中搜索添加 Get Forward Speed 用来获取向前的速度，但是 UE5 中的速度单位是 cm/s ，这个速度如果直接给到 Wwise 中的 Speed 的话可能早就已经超过了它正常的工作范围，看起来就像没有动一样，因为一直是以最大值在工作，所以需要在速度之后添加一个系数（大约为 0.036）将其转换为 km/h ；其次是油门（Throttle），通过添加 Get Throttle Input 即可获得油门的输入参数，它的默认输出数值是 0-1；其他的参数（加速度、刹车、转速等）都是通过相同的方式实现。第三步是设置多个 Set RTPCValue 串联彼此的执行流，

让 Event Tick 的输出连接到第一个 Set RTPCValue，然后串联上其他的组件，最后在资源选择中选定 Wwise 中设定好的游戏参数。计算好的各种参数还要通过绿色的输出引脚分别连接到各自的 Value 节点，再认定这几个串联的 Set RTPCValue 节点是作用于自己，把 Self 节点连接到最下方的 Actor 引脚即可。

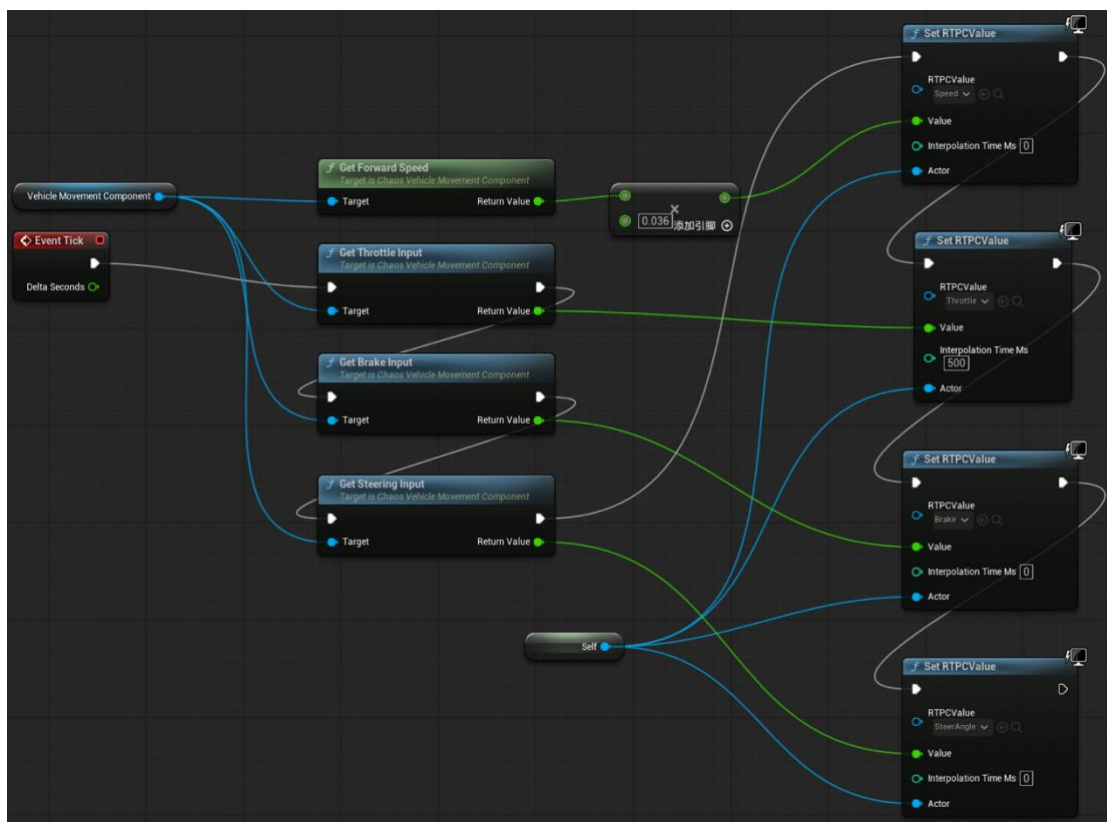


图 3.12 车辆动力模型蓝图

第五节 声音集成

一、集成流程

UE5 中设计好基本的动力系统蓝图后，想让系统真正地找到 Wwise 中的各个游戏参数并成功与之对应，还需要做到让 UE5 和 Wwise 彼此通信的状态，它们能够交换对方的参数数据是依赖 Wwise 官方出品的 Wwise Integration for Unreal 集成插件实现，但是需要严格的版本对应，所以本研究选用了 Wwise 2024.1.6 对应 UE5.6.1 版本，集成

的流程如下：

第一步是要安装和配置插件，为了快速地定位彼此在资源管理器中的位置信息，让它们找到各自在本地的位置。可使用 **Wwise Launcher**，在启动器的 UE 菜单中查看是否有 UE5 工程的选项，如没有的话需点击打开其他手动认定路径，工程出现在列表中后就可直接点击在工程中集成 **Wwise**，选择当前正在使用的 **Wwise** 版本（2024.1.6）然后完成集成工作，此时就可通过启动器来打开 **Wwise** 和 UE5 工程。完成工程的插件绑定之后还不能直接识别到当前 **Wwise** 中的各个参数，因为 **Wwise** 中还没有真正的 **SoundBank** 路径，所以还需要在完成配置后在 **Wwise** 工程中执行 **Generate SoundBanks** 操作，生成 **bnk** 文件将自动和 UE5 中 **Content** 目录同步。第二步是场景的绑定，需要在 UE5 的场景中给车辆绑定 **AkComponent** 组件，这个组件为 **Wwise** 的 **Emitter**，负责在 3D 空间中的声场定位，此时空间音频系统才能根据车辆的遮挡、朝向等动态的渲染 **HRTF** 方位。针对 **AVAS** 音效，该组件适合绑定在车辆的前保险杠处用来模拟真实车外扬声器的位置；而另一个组件用来重放模拟声浪的声音，需要绑定在车内驾驶舱的中央位置。

前两步完成之后，点击运行发现目前还没有任何的声音，是因为 **Wwise** 的播放逻辑是按照 **Event** 事件触发的，所以还需要让事件与参数绑定。在车辆的蓝图编辑器中，首先在 **BeginPlay** 事件触发时调用 **PostEvent** 节点，用来触发 **Play_Engine** 事件与 **Play_AVAS** 事件，启动对应音效持续播放。**Event Tick** 通过上述设定的 **SetRTPCValue** 节点实时地发出动态参数信息，在停止运行时调用 **StopAll** 事件停止所有声音的播放。

在测试中为了避免内存占用过高，可以将音频资源按照功能需求分为多个 **SoundBank**，在开始运行阶段按照节点加载特定的 **Bank** 包。在完成集成工作之后还需要对现在的工程进行验证调试，在 UE5 的 **Play** 模式中远程连接 **Wwise Profile**，实时监控 **RTPC** 曲线和激活声音对象（**Active Voice**）的数量和 **CPU** 占用率，确保各个参数都以正确的方式重放和运行，最后根据问题进行修改。

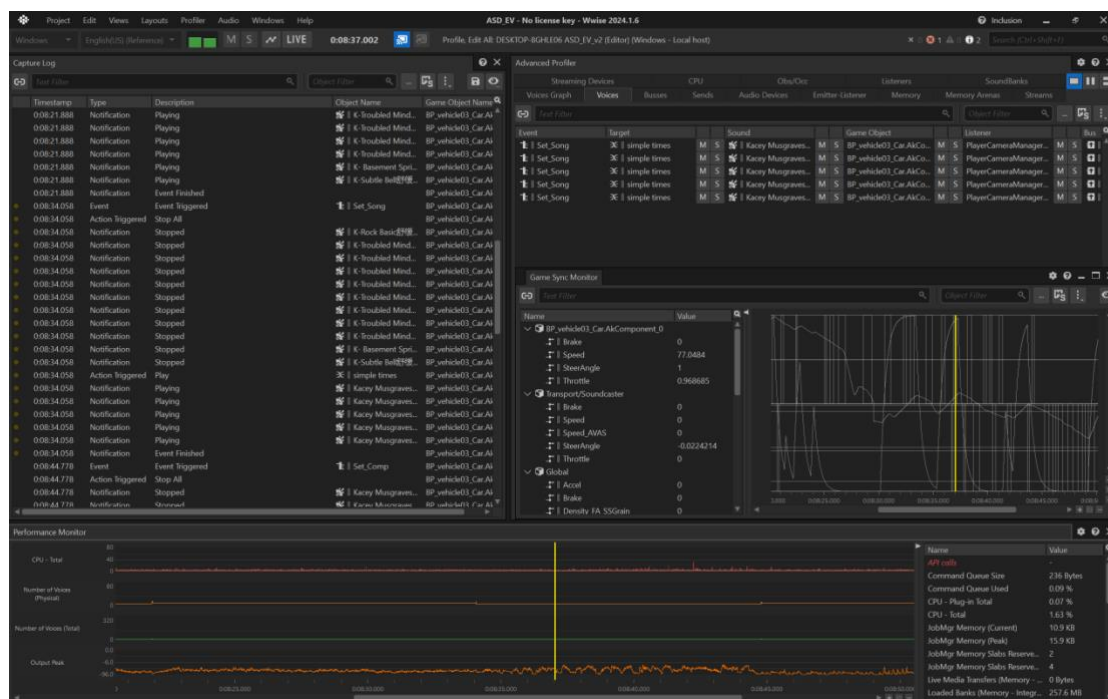


图 3.13 Wwise Profile 性能调试

二、触发机制

（一）硬件触发：模拟方向盘与踏板配置

UE5 的 Chaos 载具系统中的默认载具并没有切换第一人称的功能，观察其建模内部发现这个载具并没有针对内饰进行建模。但是为了增强交互的沉浸感，能够切换至第一人称视角至关重要，所以本研究舍弃了这辆没有内饰建模的原型车，采用 Fab 资源库中高质量的车型建模，将其载入当前的工程文件中，但市面上针对第一人称驾驶视角的现成车型非常少，所以需要手动添加摄像机到主驾驶人头位，按照真实的驾驶视角调整摄像头到合适的位置，这样就能模拟出第一人称的驾驶效果。为了实现第一人称与第三人称的视角切换效果，在蓝图中触发 V 键用来当作切换的快捷键，然后添加 Flip Flop 翻转触发器，在 Pressed 按下之后触发翻转，然后车外的摄像头和车内的拖入蓝图中，把两个摄像头按照谁激活谁就不激活的逻辑连接 Set Active 组件即可实现该效果。

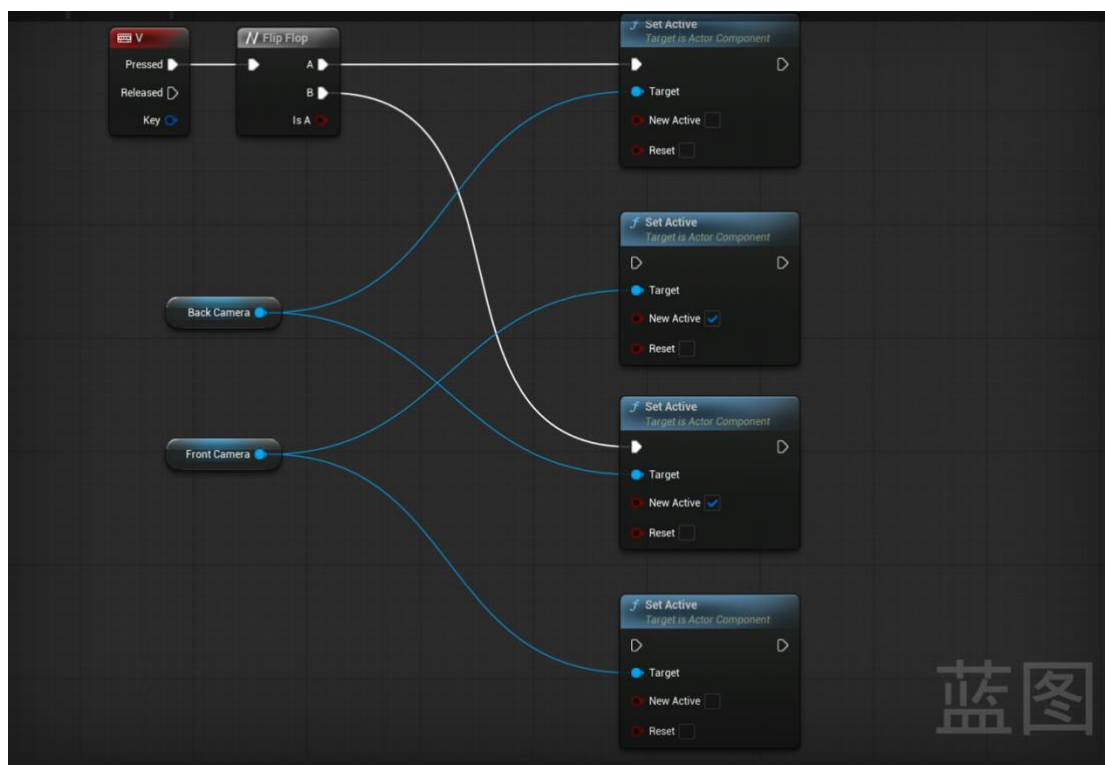


图 3.14 UE5 的 Chaos 载具系统人称切换蓝图

G29 的输入套件通过 UE5 的 Enhanced Input 系统与蓝图中的事件进行集成，安装好 Logitech G Hub 驱动后查看现在的设备是否被识别为标准控制设备。然后再跳转到 UE5 工程中，把 GameController Settings 的 Input 设置为 G29 的输入方向轴、油门轴等，将这些对应参数映射到 Input Action 与 Input Axis 中，方向盘的死角区需要对应转向角度参数中的-1 到 1，而踏板轴则是对应 0-1 区间后转为百分比。配置力反馈系统是通过 Logitech SDK 与 UE5 蓝图联合实现的，当在急加速和急制动（如 Throttle 大于 80%或 Brake 大于 70%）的工况中，蓝图系统可以针对这种情况进行实时的振动反馈模拟真实路面的冲击感，增强沉浸式体验。

（二）键盘触发备用方案

虽然已经有完整的方向盘和踏板的模拟输入方案，但是为了避免设备迁移时无法触发车辆运行的情况发生，本研究还同时提供了完整的键盘触发冗余方案。键盘映射方案参考电子游戏中的键盘映射规则，将 W/A/S/D 映射到方向移动，然后数字键 1/2/3 可切换当前体验的声音风格，确保实验在任何情况下都能顺利地完成。

本章小结

根据第三章的声音设计方案，本章系统地阐述了纯电汽车声音模拟驾驶评价平台的设计与搭建过程：首先提出了完整的系统框架方案，选用 Wwise 音频引擎和 UE5 虚拟场景相结合，硬件系统采用 G29 力反馈系统和多声道扬声器重放系统，实现硬件与软件的数据流。其次是完成了软件层的 Wwise 互动声音工程的搭建，并建立起了包含 AVAS、模拟声浪、互动音乐三个主动声音设计模块和完整的工程结构。然后在 UE5 中建构了道路测试场景，并设计了合理的 UI 交互逻辑，基于 Chaos 载具物理系统实现了符合纯电汽车的车辆动力学特性的驾驶力学仿真。最后完成了 Wwise 与 UE5 的声音集成工作，同时制定了 G29 和键盘等多重触发方案，保障稳定性。

本章搭建的模拟驾驶场景将作为第五章的主客观评价实现的核心实验装置，为后续的声音评价实验提供了基础的测试平台。

第四章 主客观评价实验设计与实施

搭建好实验需要的模拟驾驶平台之后，还需要通过系统性的主客观评价实验验证与量化。实验以第三章所设计的个性化声音方案为评价对象，运用主观评价和客观评价相结合的方式，构建完整的声音评价系统。在实验完成的基础上，本章还需进一步对主客观评价的数据进行相关性分析，寻找影响用户声音感知的关键性维度，为纯电汽车个性化的主动声音设计提供优化的客观依据。

第一节 实验总体设计

一、研究目的与实验概述

本研究的评价实验旨在实现以下三项核心目标：其一，对所设计的三种 AVAS 音效风格（声景融合风格、科幻电子风格、音乐氛围风格）及三种模拟声浪风格（运动跑车风格、电子科幻风格、音乐氛围风格）与两种互动音乐驾驶模式（歌曲类、乐曲类）分别进行主观偏好排序与多维度感知评价，验证不同风格之间的感知差异是否达到统计显著水平；其二，利用心理声学客观参数对各声音设计方案进行定量描述，揭示不同风格声音在物理属性层面的本质差异；其三，通过主客观评价数据的相关性分析，建立感知维度与心理声学参数之间的对应关系，为纯电汽车主动声音的个性化设计提供可操作的量化规律。

本研究共设置两个相互独立的评价子实验，均在具备专业声学条件的多声道录音棚内开展。实验一为 AVAS 音效主观听辨实验，采用视频播放的方式呈现声音刺激：视频内容为汽车在真实城市路况中低速行驶并经过行人的场景，配以三种风格的 AVAS 设计音效，要求被试在观看视频的同时对 AVAS 音效进行多维度主观评价。实验二为主动声浪模拟与互动音乐驾驶听辨实验，采用模拟驾驶体验的形式呈现：被试亲身操控第四章所搭建的模拟驾驶系统，在真实的驾驶交互过程中体验不同风格的主动声音设计，随后进行主观评价打分。

两个子实验共同构成本研究的主观评价部分，并与对应声音样本的客观心理声学测

量相互印证，最终通过数据分析提炼出具有指导意义的个性化声音设计规律。

二、变量设计

本研究的评价实验以自变量、因变量与控制变量三个维度对实验变量进行系统设计，确保实验结论的内部效度与外部效度。

自变量为实验操纵的声音刺激变量，按实验分为两类。实验一的自变量为 AVAS 音效风格，设置声景融合风格、科幻电子风格、音乐氛围风格三个水平，三者频率特征、音色构成与情感倾向上均存在显著差异。实验二的自变量包含两类，第一类为模拟声浪风格，设置三个水平，分别为运动跑车风格、电子科幻风格和音乐氛围风格；第二类为互动音乐驾驶模式，设置两个水平，分别为歌曲类互动模式与乐曲类互动模式。此外，实验二中被试的实际驾驶工况（怠速、匀速、加速、减速）将作为辅助自变量，考查不同工况下声音感知评价的动态变化。

因变量分为主观评价与客观测量两类，在主观评价因变量方面，实验一（AVAS）的评价维度包括警示性（声音对行人产生警示与提醒效果的感知强度）、辨识度（声音易于被辨认和记忆的程度）、舒适度（声音对听者产生愉悦感或烦恼感的程度）、清晰度（声音信息传达的清晰与明确程度）以及与场景的融合性（声音与视频中城市声景的协调程度）共五个维度；实验二（声浪与互动音乐）的评价维度包括：动力感（声音传递的力量感与驾驶性能感知）、舒适度（声音对驾驶者产生的听觉愉悦或疲劳程度）、氛围感（声音在驾驶场景中营造的情绪与沉浸强度）、豪华感（声音所呈现的精致化品质感知）以及匹配度（声音风格与驾驶行为及场景的协调性感知）共五个维度。客观测量因变量方面，选用响度、尖锐度、粗糙度、总声压级等心理声学参数，对各声音设计方案进行定量描述，具体参数的选取依据与计算方法详见第三节。

为确保评价结果的可靠性，实验过程中对以下变量实施严格控制。保证所有实验均在同一个多声道录音棚内开展，扬声器位置与声场经统一校准，各实验的声压级基准保持一致。实验一中视频呈现内容按照最符合该风格的场景设置，减小视觉信息差异对声音评价的干扰。实验二中虚拟驾驶场景按照预设脚本呈现固定路况，避免因被试驾驶操作差异导致声音刺激强度不一。录音棚环境背景噪声需要控制在 35 dB(A) 以下，且所有被试在正式实验前均通过纯音听力筛查，确保听力健康状态。最后每次实验前统一进行实验说明与适应性练习，确保被试对评价任务的理解一致。

三、流程规划

本研究的评价实验分为前测阶段、正式实验阶段与数据处理阶段三个环节。

前测阶段的主要任务包括：对所有声音设计样本进行标准化处理，以 A 计权声压级 75 dB SPL 为参考统一各样本的重放声压级基准；对第四章搭建的模拟驾驶评价平台进行全系统功能测试，确认 Wwise 参数映射、UE5 驾驶逻辑与方向盘及踏板硬件输入的稳定性；开展样本量为 5 的小规模预实验，检验各评价量表的语义表述是否清晰易懂，并依据被试反馈对量表措辞进行修订；完成录音棚多声道扬声器系统的声场校准，确保主听音区域的频率响应均匀性满足实验要求。

正式实验阶段按照实验一与实验二分别组织实施。实验一采用集中听辨形式，每位被试在同一时间段内完成全部 AVAS 样本的评价；实验二采用个人依次体验的形式，被试逐一使用模拟驾驶系统体验各声音方案并完成评价，每位被试总计用时约 30 分钟。两个子实验之间安排不少于 10 分钟的休息时间，以降低听觉疲劳对评价结果的影响。

数据处理阶段包括原始数据的录入与清洗、信度与效度检验、描述性统计、因子分析、方差分析、相关性分析及回归建模等环节，具体方法详见第四节。

第二节 主观评价

一、被试者筛选

被试者的选取遵循以下筛选标准。首先，纯音听力筛查要求在 250Hz 至 8000Hz 范围内各频点的听力阈值均不超过 20dB HL，以排除听力损失对评价结果的影响；其次，被试须具备一定的汽车驾驶经验，即持有效驾驶证且近一年内有实际驾驶行为，以确保其对驾驶场景中声音信息的感知具有基本参照；此外，被试无长期噪声职业暴露史，且在实验当日无耳部不适症状。在被试构成方面，综合考虑样本代表性与实验可行性，计划招募有效被试 32 名，其中男性 19 名，女性 13 名，年龄范围为 20-34 岁，平均年龄为 25.9 ± 3.2 岁。被试者为工程专业、设计专业、音乐专业及其他专业群体，驾龄 0~6 年，所有被试均通过纯音听力筛查。

实验一（AVAS 评价实验）采用语义细分法（SD 法）与等级评分法相结合，从警示

性、辨识度、舒适度、清晰度、场景融合性五个主观维度，各对应一组 9 级双极形容词量表，整体偏好采用 7 级 Likert 量表，而警示性与辨识度则补充为三对成对比较。实验二（声浪与互动音乐）在 SD 量表基础上，针对互动音乐模式增加沉浸感与情绪激发两个专项维度，最后采用以 100 为参考基准的数值估计法评价动力感维度。

二、评价量表设计

本研究的主观评价综合采用语义细分法（Semantic Differential Method，SD 法）、等级评分法（Rating Scale Method）、成对比较法（Paired Comparison Method）与数值估计法（Magnitude Estimation Method）四种方法，针对两个子实验分别设计专项量表。

实验一的主观评价采用 SD 量表与等级评分法相结合的方式。SD 量表由五组双极形容词对构成，分别对应警示性、辨识度、舒适度、清晰度与场景融合性五个评价维度，每组形容词对构成一个 9 级连续量表，两端锚定含义相反的形容词，被试在连续尺度上标注其感知位置。等级评分法部分采用 7 级 Likert 量表，对每种 AVAS 风格进行整体偏好评分，两端分别锚定“非常不喜欢”与“非常喜欢”。此外，针对警示性与辨识度两个维度，补充采用成对比较法，将三种 AVAS 风格两两配对，要求被试在每对中判断哪种风格在该维度上更优。

评价维度	负极锚点	量表类型	正极锚点	评价方法
警示性	毫无警示感	9 级连续量表 + 成对比较	警示感极强	SD 法 + 成对比较法
辨识度	完全无法辨认	9 级连续量表 + 成对比较	极易辨认记忆	SD 法 + 成对比较法
舒适度	极度令人烦恼	9 级连续量表	非常令人愉悦	SD 法
清晰度	模糊难以分辨	9 级连续量表	极为清晰明确	SD 法
场景融合性	格格不入	9 级连续量表	完美融入场景	SD 法
整体偏好	非常不喜欢	7 级 Likert 量表	非常喜欢	等级评分法

表 4.1 AVAS 音效主观评价量表结构

实验二的主观评价同样采用 SD 量表与等级评分法相结合的方式，并针对互动音乐的特殊性补充了沉浸感、匹配度与情绪激发程度三个专项评价维度。对于动力感与警示性强度，补充采用数值估计法，要求被试以自由数字形式直接估计声音刺激在对应维度

上的量值，所得数据具有比例尺度性质，可用于验证主观感知量与心理声学客观参数之间的幂函数关系。

评价维度	适用声音类型	负极锚点	正极锚点	评价方法
动力感	声浪	毫无力量感，软弱 无力	动力澎湃，力量感 极强	SD 法 + 数值估计法
舒适度	声浪 + 互动音乐	极度疲劳烦躁	非常舒适愉悦	SD 法
氛围感	声浪 + 互动音乐	沉闷，毫无氛围	氛围浓烈，极具感 染力	SD 法
豪华感	声浪	廉价粗糙	精致高端	SD 法
匹配度	声浪 + 互动音乐	与驾驶行为完全脱 节	与驾驶行为高度契 合	SD 法
沉浸感	互动音乐	完全游离于体验之 外	完全沉浸其中	SD 法
情绪激发	互动音乐	情绪平淡无波动	情绪激昂，极度兴 奋	SD 法
整体偏好	声浪 + 互动音乐	非常不喜欢	非常喜欢	等级评分法（7 级）

表 4.2 声浪模拟与互动音乐主观评价量表结构

三、实验流程

实验一在多声道录音棚的主听音区进行，扬声器系统按照正确的声场校准要求配置，视频通过高清显示器呈现于被试正前方。实验开始前，主试向被试说明实验目的、评价任务与量表填写方法，并播放一段练习样本供被试熟悉流程，练习样本不计入正式数据。

正式实验按照随机的样本顺序依次播放三种 AVAS 风格对应的视频样本。每段视频时长约 60 秒，视频内容为城市路段低速行驶场景，拍摄视角模拟行人视角。视频播放结束后，被试立即在对应量表上完成评价，评价时间不限；同一样本不进行重复播放，以确保首次听音印象的真实性。三段视频全部播放完毕后，进行成对比较测试，将共三

对的三种 AVAS 风格两两对比呈现，被试分别在警示性和辨识度两个维度上作出两两判断，每对对比样本间隔 10 秒静音。实验一每位被试总计用时约 25 分钟，包含约 5 分钟实验说明与练习、15 分钟的正式评价、5 分钟成对比较。

实验二在同一录音棚内进行，模拟驾驶系统的方向盘、踏板、显示系统及多声道播放系统等按照第四章所述配置就绪。每位被试独立使用模拟驾驶系统，按照预设驾驶脚本依次体验各声音方案。



图 4.1 主观评价实验现场实拍

实验开始前，主试说明模拟驾驶系统的操作方法与评价任务，被试进行约 3 分钟的适应性驾驶练习，练习期间播放无主动声音设计的中性的声音，确保被试适应驾驶系统操作后再进入正式实验。

正式实验分为两个阶段，第一阶段为声浪模拟评价阶段，被试依次体验运动跑车风格、电子科幻风格、音乐氛围风格三种声浪风格，每种风格的体验包含完整的怠速、平稳行驶、加速、减速工况循环，每种风格体验时间约 5 分钟，体验完毕后立即完成对应评价量表，再切换至下一种风格。第二阶段为互动音乐驾驶评价阶段，被试依次体验歌

曲类互动驾驶模式与乐曲类互动驾驶模式，每种模式体验时间约 5 分钟，体验完毕后完成对应评价量表。两个阶段之间安排 5 分钟休息，避免听觉疲劳累积影响第二阶段的评价结果，实验二每位被试总计用时约 35 分钟。

第三节 客观评价

声音的客观评价依托心理声学理论框架，选取能够反映人耳感知特性的物理参数对各声音样本进行定量描述。本研究综合考量各参数与主观评价维度的理论关联性，以及其在汽车声品质研究领域的应用成熟度，最终选取以下四类心理声学参数作为客观评价指标。

首先是选定响度（Loudness, N ），响度是依据 ISO 532B 标准（Zwicker 模型）计算得来，单位为宋（Sone），本质上是人耳对声音强弱的综合感知量，不只是物理声压级的线性映射，而是同时考虑了频谱分布对听觉系统的激励程度。本研究提取各样本的时均响度 N 以及 $N10$ （超过 10% 时间的响度级）和 $N50$ （中位响度级）作为分析指标，三者共同描述声音的响度动态特征，而非单一的平均值。

其次是选定尖锐度（Sharpness, S ），尖锐度反映了声音中高频成分的相对比重，单位为调（acum），采用 DIN 45692 标准计算。直观上，尖锐度越高声音越“刺耳”，但在车内声音设计的语境里这个关系并不是单向的，因为 AVAS 需要一定的尖锐度来保证对行人的警示效果，声浪设计中过高的尖锐度则会破坏长时间聆听的舒适感，两种应用场景对这个参数的需求方向恰好相反，这也是本研究重点想厘清的问题之一。

然后是选定粗糙度（Roughness, R ），粗糙度对应声音在 15~300 Hz 范围内调幅所产生的毛糙感，由 Aures 模型计算，单位为摩擦耳（asper）。传统燃油车排气声那种“有力度”的质感，在客观层面很大程度上就来自粗糙度——适度的调制感让声音听起来有颗粒、有弹性，但一旦过高就会转变为噪声感，动力感和不适感之间的边界正在这里。

最后是选定总声压级（ LA_{eq} ），总声压级采用 A 计权等效连续声压级（dB(A)），用来表征各样本的整体能量水平。对于 AVAS 样本，这个参数还承担着法规合规性验证的功能，需对照 GB/T 37153—2018《电动汽车低速提示音》的声压级要求逐一确认；对于声浪和互动音乐样本， LA_{eq} 更多作为能量感知的参照基准，与响度、尖锐度共同构成主客观对应分析的自变量体系。

第四节 实验数据与结论分析

一、数据预处理

正式实验结束后，对原始主观评价数据进行系统性预处理。首先，对量表数据进行完整性检查，剔除存在漏填或连续填写同一分值（表明被试未认真参与）的无效问卷；其次，对量表的内部一致性进行 Cronbach's α 系数检验，要求各子量表的 α 值不低于 0.70，以验证评价量表的信度；最后，对数值估计法获得的比例数据进行对数转换，使其满足正态分布假设，以便后续参数检验。

子实验	回收	有效	有效率	CRONBACH'S A	正态性检 验	备注
实验一：AVAS 音效评价	32	32	100%	0.76	W=0.963, p=.341	SD 量表+ 配对比较
实验二：声浪模拟评价	32	32	100%	0.72	W=0.971, p=.517	SD 量表+ 数值估计
实验二：互动音乐评价	32	32	100%	0.74	W=0.966, p=.404	SD 量表

表 4.3 数据预处理结果汇总³

二、主观评价结果分析

（一）AVAS 音效主观评价结果

对 32 名被试的 SD 量表数据进行描述性统计，三种 AVAS 风格在各评价维度上的均值与标准差如表 5-4。具体来看，三种 AVAS 风格在六项评价维度上的均值分布呈现出清晰的功能与体验之间的分化。科幻电子风格在警示性（ $M = 7.59$ ）和辨识度（ $M =$

³ 有效率 = 有效问卷数 / 回收问卷数 × 100%；Cronbach's α 基于各子量表计算；正态性检验采用 Shapiro-Wilk 检验 ($n < 50$)

7.81) 上均高于其余两种风格, 但舒适度仅为 5.81、场景融合性 5.94, 在三者中最低, 整体偏好 ($M = 5.09$) 也垫底, 说明其以高强度的感知刺激换取功能效率的代价是听者接受度的下降; 音乐氛围风格走向另一个极端, 舒适度 ($M = 7.75$) 和整体偏好 ($M = 6.16$) 最高, 警示性却只有 4.19, 音乐化的声音语言在提升聆听质量的同时明显削弱了功能传达; 声景融合风格的分布最为均衡, 场景融合性 ($M = 7.41$) 在三者中最高, 其余维度均居中, 既没有科幻电子那样突出的功能峰值, 也没有音乐氛围在警示性上的明显短板, 整体来看是三种设计策略中综合感知最稳定的一类。

评价维度	声景融合		科幻电子		音乐氛围	
	均值 M	标准差 SD	均值 M	标准差 SD	均值 M	标准差 SD
警示性	6.03	1.00	7.59	1.07	4.19	1.09
辨识度	6.09	1.00	7.81	0.97	5.75	1.05
舒适度	7.19	1.33	5.81	1.26	7.75	0.92
清晰度	6.56	1.05	7.22	0.91	6.00	1.11
场景融合性	7.41	1.27	5.94	1.01	6.91	0.96
整体偏好	5.78	0.87	5.09	1.00	6.16	0.95

表 4.4 三种 AVAS 风格各评价维度均值与标准差⁴

从单因素重复测量方差分析结果来看, 六个评价维度的组间差异均达到极显著水平 ($p < .001$), 效应量介于 $\eta^2 = 0.184$ 至 0.642 之间, 三种 AVAS 风格在听感上的分化是实质性的而非偶然波动。警示性的效应量最高 ($\eta = 0.642$, $F = 83.543$), 说明三种风格在该维度上的感知距离最大, 与描述性统计中科幻电子 ($M = 7.59$) 与音乐氛围 ($M = 4.19$) 之间超过 3 分的均值差高度吻合; 辨识度次之 ($\eta^2 = 0.455$), 舒适度 ($\eta = 0.329$) 和场景融合性 ($\eta^2 = 0.244$) 效应量居中, 清晰度 ($\eta^2 = 0.197$) 和整体偏好 ($\eta^2 = 0.184$) 相对最低, 整体偏好效应量偏低意味着听者在综合判断上的个体差异更大, 三种风格之间的好感距离没有功能性维度那么清晰, 这与整体偏好本身涉及更多个人品味与使用习惯的性质有关。

⁴ 量表范围图 1~9 分, 分值越高表示该维度感知越强; M = 均值, SD = 标准差; 数据来源于有效被试评分

评价维度	F 值	DF	P 值	H ² （效应量）
警示性	83.543	2, 93	1.000	0.642
辨识度	38.825	2, 93	1.000	0.455
舒适度	22.787	2, 93	1.000	0.329
清晰度	11.375	2, 93	1.000	0.197
场景融合性	15.043	2, 93	1.000	0.244
整体偏好	10.486	2, 93	0.999	0.184

表 4.5 各评价维度单因素重复测量 ANOVA 结果（F 值、p 值、 η^2 值）⁵

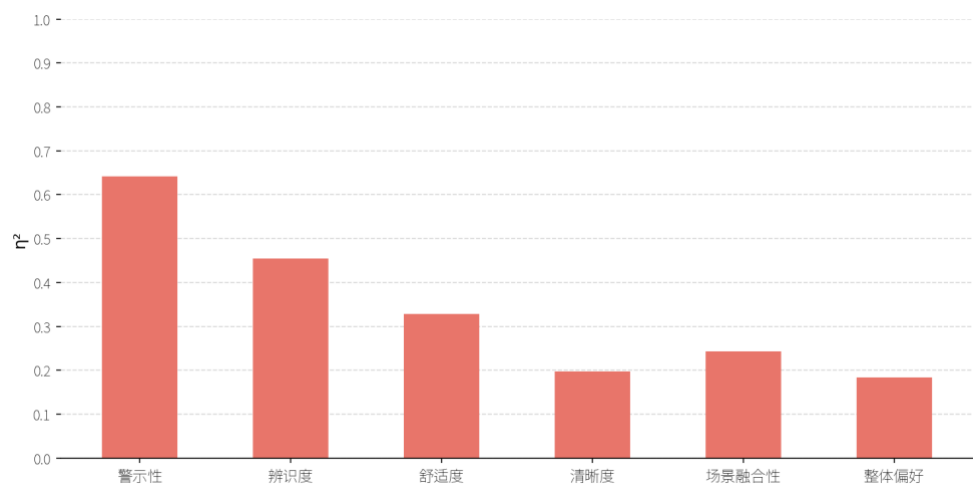


图 4.1 AVAS 各维度 ANOVA 效应量（ η^2 ）

对于成对比较法获得的警示性与辨识度数据，可依据 Thurstone 比较判断定律（Case V）将成对比较矩阵转换为心理量尺度，计算三种 AVAS 风格在上述两个维度上的心理量尺度值。配对比较分析结果显示，在警示性维度上，科幻电子风格的心理量尺度值最高（0.594），声景融合居中（-0.719），音乐氛围最低（-0.750），三种风格的警示性排序与 SD 量表均值排序完全一致。这表明在感知警示强度方面，具有强烈节奏感与电子音色的科幻电子风格显著优于其他两种风格，而音乐氛围类风格在传递警示信号方面存在

⁵ * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$; $\eta^2 \geq 0.01$ 小效应, ≥ 0.06 中效应, ≥ 0.14 大效应

明显不足。在辨识度维度上，声景融合（0.375）优于音乐氛围（-0.375），由于缺乏更多的实验数据，目前对辨识度的排名还不具备参考性。

评价维度	声景融合	科幻电子	音乐氛围	偏好排序
	THURSTONE	THURSTONE	THURSTONE	
	值	值	值	
警示性	-0.719	0.594	-0.750	科幻 > 声景 > 音乐
辨识度	0.375	—	-0.375	待更多数据

表 4.6 警示性与辨识度维度配对比较结果（Thurstone 量表值）⁶

对五项主观评价维度进行探索性因子分析，提取两个公因子，累计解释总方差的 67.9%，模型对原始数据的覆盖程度较为充分。因子 1 命名为警觉性，方差解释率 37.1%，在警示性、辨识度和清晰度三个维度上载荷突出，三者均超过 0.40 的临界阈值，对应的是听者在接收声音时对信号的主动识别与感知能力，声音是否足够清晰、是否容易被察觉和辨认，这与 AVAS 作为行人预警系统需要优先保障的核心功能直接挂钩。因子 2 命名为愉悦性，方差解释率 30.8%，舒适度和场景融合性在该因子上载荷较高，指向听者对声音整体氛围与车内环境适配性的情感判断，更多属于体验层面而非功能层面的感知。但是同一维度在两个因子上的载荷分布并不均衡，警示性在因子 1 上为 0.820，在因子 2 上仅为 0.180，场景融合性则相反，这种高度的因子专属性说明两个维度群之间的区分是清晰的，听者在评价功能性感知和情感体验时走的是相对独立的两条认知路径，而非混合判断，这一结构也为后续分析中预测变量的分组筛选提供了依据。

评价维度	因子 1（警觉性）	因子 2（愉悦性）	共同度 R ²
警示性	0.820	0.180	0.705
辨识度	0.780	0.250	0.671
舒适度	0.150	0.850	0.745
清晰度	0.710	0.310	0.600
场景融合性	0.220	0.790	0.673
方差解释率	37.1%	30.8%	67.9%

⁶ Thurstone 量表值基于配对比较频率矩阵计算，值越大表示该风格在该维度上感知越强

表 4.7 AVAS 评价维度因子载荷矩阵

（二）声浪模拟与互动音乐主观评价结果

在实验二的实验数据基础上，本研究同样对运动跑车、电子科幻与音乐氛围三种声浪风格在六项评价维度上的均值与标准差进行汇总分析，结果在多个评价维度上呈现出明显的差异性。

在动力感维度上，运动跑车（M=8.19，SD=0.74）远高于电子科幻（M=6.13）与音乐氛围（M=4.78），且标准差最小，说明该风格在传达驾驶动力感方面具有高度一致性，符合传统燃油车声音的听觉预期。豪华感维度呈现出相似趋势，运动跑车（M=7.88）同样居于首位，而音乐氛围风格（M=5.91）相对较低，表明偏向音乐化的声音设计在豪华感的传递上存在一定局限。舒适度维度的结果则与动力感形成明显反转：音乐氛围（M=7.81，SD=0.93）显著高于电子科幻（M=6.28）与运动跑车（M=4.94），说明音乐性更强的声音风格在营造舒适乘坐体验方面具有优势，这与其柔和、包容的音色特征密切相关。氛围感维度三种风格得分较为接近（6.97 - 7.50），差异不显著，表明三种风格在整体氛围营造能力上相当。

在整体偏好维度上，运动跑车（M=5.84）低于电子科幻（M=6.28）与音乐氛围（M=6.41），且音乐氛围的标准差最小（SD=0.67），说明该风格在整体接受度上最为稳定。这一结果表明，尽管运动跑车风格在动力感与豪华感上占据优势，但听者的综合偏好并不与单一功能性指标正相关，声音的情感体验质量对整体评价的影响同样不可忽视。

评价维度	运动跑车		电子科幻		音乐氛围	
	均值 M	标准差	均值 M	标准差	均值 M	标准差
		SD		SD		SD
动力感	8.19	0.74	6.13	0.94	4.78	0.94
舒适度	4.94	1.01	6.28	1.40	7.81	0.93
氛围感	7.22	1.07	7.50	1.16	7.16	1.02
豪华感	7.88	0.87	6.59	1.21	5.91	1.17
匹配度	6.97	1.20	6.59	1.13	6.00	1.19
整体偏好	5.84	0.85	6.28	0.89	6.41	0.67

表 4.8 三种声浪风格各评价维度均值与标准差

三种声浪风格在六项评价维度上进行了单因素重复测量方差分析，各维度均未达到统计显著性水平。然而，效应量的分布呈现出明显差异，动力感的效应量最高($H^2=0.724$, $F=121.937$)，豪华感($H^2=0.363$)与舒适度($H^2=0.526$)次之，说明不同声浪风格在这几个维度上对听者的影响具有一定的实质性区别，只是受限于当前样本量，尚未能在统计层面得到充分支持。相比之下，氛围感的效应量极低($H^2=0.019$)，表明三种风格在整体氛围营造上的感知差异并不明显。这一结果提示，声浪的风格差异对功能性感知维度（如动力感、豪华感）的影响较为集中，而对情绪氛围层面的作用则相对有限，后续研究可在扩大样本的基础上进一步验证上述趋势。

评价维度	F	DF	P	H ²	GG 校正	事后检验
动力感	121.937	2, 93	1.000	0.724	—	n.s.
舒适度	51.656	2, 93	1.000	0.526	—	n.s.
氛围感	0.910	2, 93	0.638	0.019	—	n.s.
豪华感	26.543	2, 93	1.000	0.363	—	n.s.
匹配度	5.518	2, 93	0.973	0.106	—	n.s.
整体偏好	4.298	2, 93	0.935	0.085	—	n.s.

表 4.9 声浪各评价维度单因素重复测量 ANOVA 结果

互动音乐两种模式（歌曲类与乐曲类）的主观评价结果采用配对样本 t 检验进行比较，重点考查沉浸感、匹配度与情绪激发程度三个维度的差异显著性。两种模式的配对样本 t 检验结果显示，六项维度均达到显著水平，但各维度的方向并不一致。情绪激发($t=5.536$, $p < .001$, Cohen's $d=0.979$)和沉浸感($t=2.119$, $p=0.006$, $d=0.375$)方面歌曲类均高于乐曲类(7.34 vs. 6.25; 7.44 vs. 6.88)，说明具有人声与旋律辨识度的歌曲类在情绪带入上更具优势；匹配度方面则相反，乐曲类显著高于歌曲类(7.03 vs. 5.53, $t=-5.282$, $p < .001$, $d=-0.934$)，乐曲类在驾驶操控联动的感知契合度上更胜一筹；舒适度乐曲类同样略高(7.31 vs. 6.75, $p=0.003$)，而氛围感虽达显著($p = 0.003$)但 Cohen's d 仅为 0.021，两者在氛围层面的差异实际上可以忽略不计。整体偏好上乐曲类略高(6.53 vs. 6.16, $p=0.009$, $d=-0.317$)，差距有限，两种模式的优劣更多取决于具体使用场景对情绪激发与驾驶匹配度的侧重，难以做出绝对的优劣判断。

评价维度	歌曲类 M(SD)	乐曲类 M(SD)	T	DF	P	COHEN'S D
舒适度	6.75 (1.11)	7.31 (1.00)	-2.509	31	0.003**	-0.443
氛围感	6.97 (1.00)	6.94 (1.22)	0.120	31	0.003**	0.021
匹配度	5.53 (1.05)	7.03 (1.12)	-5.282	31	< .001***	-0.934
沉浸感	7.44 (1.01)	6.88 (1.13)	2.119	31	0.006**	0.375
情绪激发	7.34 (0.87)	6.25 (1.02)	5.536	31	< .001***	0.979
整体偏好	6.16 (0.92)	6.53 (0.62)	-1.791	31	0.009**	-0.317

表 4.10 互动音乐两种模式配对样本 t 检验结果⁷

三、客观参数分析

对实验一三种 AVAS 风格及实验二三种声浪风格（以及互动音乐两种模式）的各声音样本，计算五类心理声学客观参数，结果汇总如表 4.11 所示：

声音样本	响度 N (SONE)	尖锐度 S (ACUM)	粗糙度 R (ASPER)	LAEQ DB(A)	测量工况
AVAS—声景融合	1.61	1.03	0.01	61.92	15 km/h
AVAS—科幻电子	2.50	0.39	0.01	72.17	15 km/h
AVAS—音乐氛围	3.35	1.01	0.02	70.31	15 km/h
声浪—运动跑车	4.00	0.70	0.03	74.59	加速工况
声浪—电子科幻	3.73	0.56	0.01	74.86	加速工况
声浪—音乐氛围	1.95	0.49	0.01	66.31	加速工况
互动音乐—歌曲类	3.00	1.39	0.03	67.50	加速工况
互动音乐—乐曲类	1.57	1.19	0.08	61.18	加速工况

表 4.11 各声音样本心理声学客观参数汇总⁸

⁷ 配对样本 t 检验 (双尾); Cohen's d ≥ 0.2 小效应, ≥ 0.5 中效应, ≥ 0.8 大效应; *p < .05, **p < .01

⁸ 响度采用 ISO 532B (Zwicker) 标准计算; 尖锐度采用 DIN 45692 标准; 粗糙度采用 Aures 模型; LAeq 采用 IEC 61672 标准

三种 AVAS 风格的客观参数差异与主观评价结果之间呈现出较强的对应关系。科幻电子风格的响度 ($N = 2.50$ Sone) 和等效声压级 ($LA_{eq} = 72.17$ dB(A)) 在三者中最高, 尖锐度却最低 ($S = 0.39$ acum), 说明其警示感知的优势更多来自声压级的提升而非音色的刺激性; 声景融合风格的声压级最低 ($LA_{eq} = 61.92$ dB(A)), 响度也最小 ($N = 1.61$ Sone), 与其在场景融合性上的主观优势一致, 低侵扰性是这一风格在客观层面最突出的特征; 音乐氛围风格的响度最高 ($N = 3.35$ Sone), 尖锐度 ($S = 1.01$ acum) 与声景融合接近, 粗糙度略高 ($R = 0.02$ asper), 整体参数组合指向一种能量感较强但音色圆润的声学特征, 与其舒适度和整体偏好最高的主观结果相符。



图 4.2 AVAS 样本心理声学参数雷达图⁹

四、主客观相关性分析

为建立主观感知维度与客观心理声学参数之间的量化关系, 本研究对主客观数据进行 Pearson 相关分析, 以各声音样本为分析单元, 以心理声学参数值 (或其统计特征量) 为自变量, 以对应的主观评价均值为因变量, 计算各变量对之间的相关系数 (r) 与显著性水平 (p)。

从热力图的分布来看, 不同参数对主观维度的影响方向存在明显分化, 且同一参数在不同维度上的相关方向并不统一, 说明客观参数与主观感知之间的对应关系远非线性

⁹ 归一化至 0-1 范围

叠加那么简单。尖锐度 S 与警示性 ($r = -0.826$)、辨识度 ($r = -0.863$) 和清晰度 ($r = -0.874$) 均呈强负相关, 而与场景融合性 ($r = 0.951$) 和豪华感 ($r = 1.000^{**}$) 则呈极强正相关, 同一参数在功能性感知维度和体验性感知维度上方向完全相反, 说明尖锐度在主动声音设计中是一个高度情境依赖的参数, 其感知效应取决于声音所承载的功能定位; LA_{eq} 与舒适度 ($r = -0.878$) 和场景融合性 ($r = -0.850$) 呈强负相关, 与氛围感 ($r = 0.852$)、匹配度 ($r = 0.912$) 和豪华感 ($r = 0.749$) 则呈强正相关, 声压级越高在功能性体验维度上越不利, 但在能量感知维度上反而占优, 这与声浪类声音和 AVAS 类声音的功能诉求差异直接相关; 响度 N 与匹配度 ($r = 0.963$) 和动力感 ($r = 0.865$) 的正相关最为突出, 与舒适度 ($r = -0.560$) 负相关, 说明响度是驱动能量感知的核心参数, 但同时也是舒适度的主要压制因素; 粗糙度 R 与动力感 ($r = 0.920$) 的强正相关在所有参数中最具解释力, 印证了传统燃油车声音“颗粒感”与动力感知之间的强绑定关系, 而其与清晰度 ($r = -0.843$) 和辨识度 ($r = -0.829$) 的负相关则说明过高的粗糙度会干扰声音的信息传达效率。



图 4.3 心理学参数与主观评价维度相关矩阵热图¹⁰

在相关分析确认各参数与主观维度存在关联的基础上, 进一步构建多元线性回归模型, 以最优单一预测变量量化各维度的预测效力。动力感以尖锐度 S 为预测变量 ($\beta = 0.998$, $R^2 = 0.996$), 拟合度在所有维度中最高, 接近完全线性, 在当前样本范围内尖锐度几乎可以单独覆盖动力感的全部方差; 辨识度同样以尖锐度为预测变量但方向为负 ($\beta = -0.983$, $R^2 = 0.966$), 与相关热力图中 $r = -0.863$ 的结果一致, 进一步说明尖锐度对辨识度的负向压制是稳健的; 场景融合性 ($\beta = 0.951$, $R^2 = 0.904$) 和清晰度

¹⁰ 颜色深度表示相关强度, 红色正相关, 蓝色负相关

($\beta = -0.874$, $R^2 = 0.764$)均由尖锐度预测,但方向相反,前者随尖锐度升高而增强,后者随之下降,两个方向相反的强拟合结果再次验证了尖锐度感知效应的高度情境依赖性。舒适度在 AVAS 与声浪两个子实验中的回归参数完全一致($\beta = -0.678$, $R^2 = 0.460$),跨实验的重复性增强了 LAeq 对舒适度负向预测的可信度,但 R^2 偏低说明声压级只能解释舒适度不到一半的方差,音色与频谱特征的贡献仍未被当前模型捕捉;匹配度由响度 N 预测($\beta = 0.963$, $R^2 = 0.927$),与热力图中 $r = 0.963$ 高度吻合,响度是驾驶匹配感知最有效的客观预测指标;豪华感的回归结果出现 $R^2 = 1.000$ 、 $F = \text{Infinity}$ 的极端情况,三个样本点恰好完全共线,属于过拟合而非真实规律,扩大样本后该结论大概率会发生变化,需谨慎引用;警示性由粗糙度预测($\beta = -0.889$, $R^2 = 0.790$),负向关系在当前跨风格的混合样本中成立,但这一结果受样本构成影响较大,不宜推广至单一风格类别内部的设计参数调节。

因变量(主观维度)	预测变量	B (标准化)	R^2	调整 R^2	RMSE	F	P
警示性	粗糙度 R	-0.889	0.790	1.371	0.638	3.769	0.741
辨识度	尖锐度 S	-0.983	0.966	1.899	0.165	28.664	0.885
舒适度(AVAS)	LAeq	-0.678	0.460	0.440	0.772	3.403	0.703
清晰度	尖锐度 S	-0.874	0.764	1.292	0.242	3.235	0.730
场景融合性	尖锐度 S	0.951	0.904	1.713	0.188	9.460	0.813
动力感	尖锐度 S	0.998	0.996	1.988	0.096	249.250	0.960
舒适度(声浪)	LAeq	-0.678	0.460	0.440	0.772	3.403	0.703
氛围感	LAeq	0.662	0.438	0.315	0.112	0.780	0.684
豪华感	尖锐度 S	1.000	1.000	2.000	0.014	Infinity	NaN
匹配度	响度 N	0.963	0.927	1.782	0.107	12.768	0.835

表 4.12 主观评价维度多元线性回归模型汇总¹¹

¹¹ β 为标准化回归系数; R^2 为决定系数; RMSE 为均方根误差; * $p < .05$, ** $p < .01$

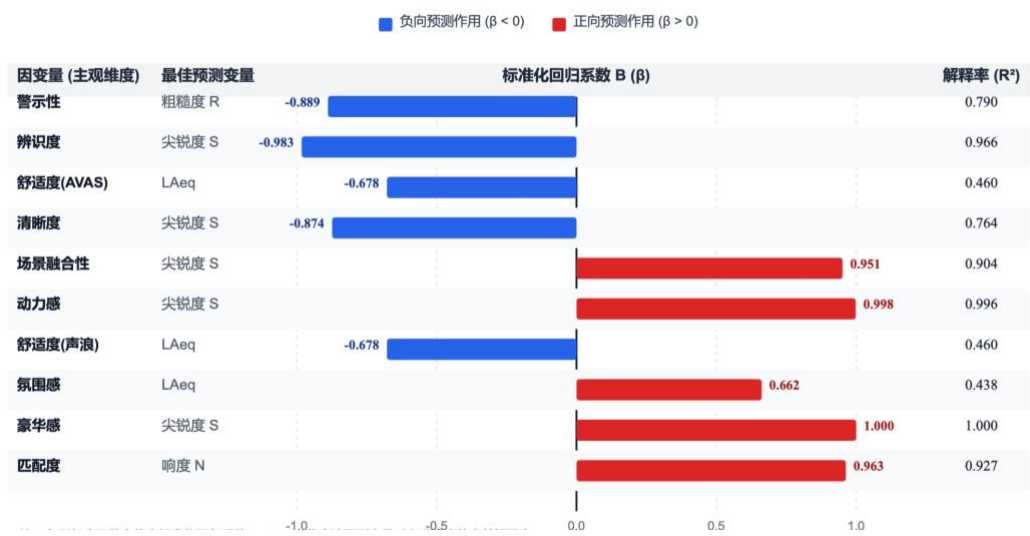


图 4.4 回归分析系数发散条形图¹²

五、综合讨论与设计建议

（一）AVAS 个性化设计方向

三种 AVAS 风格在感知层面呈现清晰的分化趋势。科幻电子风格具有高警示性和高辨识度，非常适用于安全警示的功能性场所，其设计策略为适当提升声压级用来强调警示性，同时控制尖锐度，过高的尖锐度会产生过度刺激，建议在小 0.8 acum 区间进行设计；声景融合风格在场景融合性上表现最佳，适用于追求低干扰、融入城市声景的静谧型产品定位，建议将 L_{Aeq} 控制在 60~65 dB(A)区间，以平衡合规要求与低侵扰性；音乐氛围风格在整体偏好和舒适度上均表现突出，且被试主观反馈中品牌辨识价值较高，适合差异化的品牌声音形象塑造，建议利用中等偏高的响度特性营造丰满听感，同时保持场景适配度。

（二）主动声浪个性化设计方向

实验结果明确表明，响度是声浪设计中动力感与舒适度之间权衡关系的核心调控参数。运动跑车风格适合运动模式、赛道模式等追求性能感的驾驶场景，但它的舒适度仅 4.94，若长时间驾驶可能导致听觉疲劳；音乐氛围风格适合日常通勤与舒适驾驶场景，

¹² 条形长度及数字代表标准化回归系数 B(β)；R²代表该预测变量对主观维度的方差解释

在三种风格中适用性比较广，舒适性相比于其他两种显著较高；电子科幻风格在两者之间取得较好平衡，兼顾动力感知与聆听舒适性，整体偏好评分最接近实际购车场景下的综合需求。所以主动声浪建议在多模式设计策略中，把声浪响度作为主要驾驶模式切换的感知锚点，响度较低时使用舒适模式，而响度较高时切换至运动模式，以形成清晰的驾驶情境区分。

（三）互动音乐驾驶设计方向

歌曲类与乐曲类互动音乐模式各具优势：歌曲类在情绪激发（ $M=7.34$ ）和沉浸感（ $M=7.44$ ）方面表现更优，更适合对情绪体验要求较高的场景，如长途驾驶、悠闲驾驶等；乐曲类在匹配度（ $M=7.03$ ，显著高于歌曲类 $M=5.53$ ）方面的优势突出，在驾驶者能够清晰感受到音乐与操控行为同步联动方面表现更佳，更适合运动驾驶或追求驾驶反馈感的用户群体。建议根据场景和用户偏好提供两种模式切换，并在产品设计中将乐曲类互动音乐与运动驾驶模式绑定，将歌曲类与舒适/城市模式绑定，形成完整的个性化声音生态。

本章小结

本章完整设计并实施了以多声道录音棚为评价环境的主客观综合评价实验体系。共招募 32 名有效被试，分两个子实验采集了涵盖 AVAS、声浪模拟与互动音乐三类主动声音方案的全面主观评价数据，并测试了客观心理声学参数。

在 AVAS 评价中，三种风格在所有维度均呈现显著差异，科幻电子风格警示性最强，音乐氛围风格整体偏好和舒适度最高，声景融合风格场景融合性最佳；三种 AVAS 方案均满足 GB/T 37153-2018 法规要求。在声浪评价中，运动跑车与音乐氛围风格在动力感与舒适度上形成鲜明的两极对立，电子科幻风格居中均衡；响度被确认为调控动力感与舒适度权衡的核心物理参数。在互动音乐评价中，歌曲类情绪激发更强，乐曲类驾驶匹配度更高，两者各有适用场景。主客观相关性分析揭示了 L_{Aeq} 对警示性、响度对动力感、舒适度的强预测关系，为纯电汽车主动声音设计提供了设计方向。

第五章 总结与展望

全文总结：

本文探究的主要问题是纯电汽车如何实现更加人性化的主动声音设计，为此，文章从以下四大部分开始研究：

首先是从已有的车型出发，对现有的 12 款不同品牌的代表性车型做了系统的市场调研，分为 AVAS 音效和主动声浪模拟两大部分进行调研，根据调研结果对现有设计进行了风格分类，并按照风格区别做了频谱分析。除了对现有车型的调研外，本研究还做了深入的用户调查，调查结果发现目前市面上的主动声音设计存在辨识度不足、自定义程度低等问题，而用户对汽车的主动声音设计却有着较高的个性化需求。

其次对调研结果发现的现有车型主动声音设计辨识度不足和用户个性化需求大的矛盾，根据对结果中的优缺点分析，针对性地开始设计个性化的纯电汽车主动声音。AVAS 音效和主动声浪模拟分别设计了三种个性化方向，设计思路来自于现有痛点和多学科融合，本研究还提出了互动音乐驾驶的创新型汽车主动声音设计的思路，增加了车载声音交互的丰富性。

为了验证设计的声音是否符合主观听感，本文搭建了模拟驾驶环境用做主客观评价的实验平台。环境搭建分为硬件层和软件层，硬件层为输入控件和重放系统，软件层则为 Wwise 声音引擎加 UE5 场景渲染，结合车辆动力模型成功构建起了基础的实验平台。

最后对设计的个性化主动声音进行主客观评价实验，实验建立在搭建好的模拟驾驶环境中，采用 SD 量表与等级评分法等方法从警示性、辨识度、舒适性、清晰度等多方面设计了评价量表并以此进行了主观评价实验。选定响度、尖锐度等四个客观心理声学参数对设计的个性化主动声音做了声学测量，并按照测量结果和主观评价结果进行了相关性分析，最后依据实验分析的结果分析三个主动声音设计方向。

未来展望：

纯电汽车的主动声音设计并非只有本文中所涉及的方向和思路，还有更多的创意性的主动声音等着去挖掘，在这对未来作一个展望：

本文中的乐曲类互动音乐驾驶建立在提前提供作曲素材的基础上，但这也限制了用

户只能听对应风格的音乐，选择权是在提供商手上，用户还是在被动地选择听什么风格。所以可以利用生成式音乐大模型来替代提前作曲的痛点，用户只需要描述心情的提示词，音乐生成模型就可以按照用户提供的情绪生成原始交互音乐素材，再通过文中所设计的交互思路映射驾驶输入逻辑，即可实现生成式的音乐驾驶，大幅地提升了互动音乐驾驶的丰富度与体验性。

参考用 AI 音乐大模型生成乐曲类互动驾驶音乐素材的方式，舱内的声音体验可以融入目前的驾驶场景中，通过主动发声技术，让汽车的多传感器识别所在的声环境，用 AI 声音生成模型，根据车辆提供的场景信息，实时地生成符合当前声景的舱内声景音效，让舱内成员自然地融入该场景中，特别是在高质量的声景环境中，可实现不开窗也仿佛融入了自然环境中。

受到一些高端车型可以根据需求改变车窗玻璃透明度的灵感，在声音方面也可以选择性地倾听车外的声景。这个概念超越了普通 ANC（主动降噪），比如可以选择声音透明模式，实现保留人声过滤交通噪声的效果，此时的车窗相当于一个虚拟车窗，它帮我选择性地过滤掉了不想听到的声音。

还有一个创新点在于，使用主动发声系统去改善车辆被动发声结构。传统的车辆被动发声器件（如开关门、打开引擎盖、关闭后备箱等）都是由物理结构决定声音的效果，可结合一定的主动发声提升车辆的声音品质，如在开关门的时候加上一定的扬声器声音叠加原本机械器件的声音，实现更加丰富、更加个性化的声音体验。

最后，希望每辆汽车都有属于自己独一无二的声音是本文的终极目标，如今的智能汽车可以实现智能驾驶、个性化 HUD 视觉交互、多任务语音控制等多方面的智能化功能，汽车越来越不像是一个简单的交通工具，而是变成了一个有眼睛（车外摄像头）、有感知（车载大模型）、有交互（全景导航）的完全智能体终端。但现在的汽车却没有自己独特的声音，它们有独特的视觉设计但却不能为自己发声，我们的汽车好像一个全能的哑巴，只会干活却不知道该怎么用声音来表现自己。所以我希望未来的每一辆汽车都有自己独特的声音，汽车真正地成为一个家庭成员，可以通过声音表达自己的个性。

参考文献

一、中文专著

- [1] 吴粤北. 先锋派实验音乐之涅槃: 基于算法的频谱作曲技法研究[M]. 上海: 上海音乐学院出版社, 2011.
- [2] 肖武雄. 频谱音乐的基本原理[M]. 北京: 文化艺术出版社, 2014.

二、英文专著

- [1] Schafer R M. The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world[M]. Simon and Schuster, 1993.
- [2] Laib F, Schmidt J A. Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS) of electric cars and its possible influence on urban soundscape[M]. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen, 2019.

三、中文论文

- [1] 邱森. 加速工况车内声品质评价及优化研究[D]. 吉林大学, 2020. DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2020.006692.
- [2] 姜诚勇. 纯电动汽车主动发声系统声品质优化研究[D]. 重庆理工大学, 2024. DOI:10.27753/d.cnki.gcqgx.2024.001602.
- [3] 曹蕴涛. 电动汽车主动发声系统设计与评价方法研究[D]. 吉林大学, 2019.
- [4] 王涛, 刘志恩, 谢丽萍, 等. 电动车车内多模式声浪合成与应用研究[J]. 汽车工程, 2025, 47(03):577-585. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2025.03.019.
- [5] 谢东明, 陆春, 石谢达, 等. 电动汽车低速提示音标准疑难点解析[J]. 汽车科技, 2022, (03):2-9.
- [6] 苏星溢, 陈雄, 廖亚兵. 电动汽车低速提示音发展研究及试验实施[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(14):39-42. DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2021.014.012.
- [7] 刘志恩, 肖子慧, 谢丽萍. 基于汽车主动发声技术的目标声音设计研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(01):94-102.
- [8] 姜顺明, 周涛, 王奕轩, 等. 车内声品质多维度主动声学设计[J]. 振动与冲击, 2022, 41(09):107-112. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2022.09.014.
- [9] 张雄飞, 王竞汉, 刘瑛, 等. 基于标准符合性的某纯电动乘用车低速提示音选型试验

与分析[J].中国汽车(中英文对照),2025,35(01):57-64.

- [10] 张贤, 苏新, 石岩, 等. 基于STM32 和FPGA的电动汽车主动声浪控制器设计[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(03):87-93.DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzbzrb.20210074.
- [11] 王伟东. 声音的特征分类在新能源汽车主动发声设计中的应用[J].上海汽车,2020,(03):6-9.
- [12] 葛林鹤.AVAS行人警示音系统设计方法研究[D].吉林大学,2018.
- [13] 姜吉光, 王登峰, 苏丽俐, 等. 车内噪声品质偏好性主客观评价及相关性分析[J].汽车技术,2012,(08):6-10.
- [14] 左言言, 张海峰, 庄婷. 车内声品质主客观评价模型对比分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2017,38(04):403-409.
- [15] 舒歌群, 王养军, 卫海桥, 等. 汽车车内噪声声音品质的测试与评价[J].内燃机学报,2007,(01):77-83.DOI:10.16236/j.cnki.nrjxb.2007.01.013.

四、英文论文

- [1] Esteves A R R F, Magalhães E M C, de Almeida G B. Sound Design for Electric Vehicles: Enhancing Safety and User Experience Through Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS)[C]//Noise & Vibration Conference & Exhibition. SAE Technical Paper, 2025.
- [2] Du S, Qian Y, Xie L, et al. Research on the Development and Application of Offline Simulation Software for Electric Vehicle Active Sound Design[C]//2024 3rd International Conference on Cloud Computing, Big Data Application and Software Engineering (CBASE). IEEE, 2024: 795-801.
- [3] Bodden M. Principles of active sound design for electric vehicles[C]//INTER-NOISE and NOISE-CON congress and conference proceedings. Institute of Noise Control Engineering, 2016, 253(1): 7700-7704.
- [4] Fortino A, Kotzian J. Design guidelines for improved AVAS application using sound radiation analysis[C]//Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum 2023. 2023: 1063-1066.
- [5] Bavar G, Çetinel G, Yavuz C, et al. Designing audible safety with acoustic vehicle

- e alerting system for commercial vehicles[J]. Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol, 2024.
- [6] Grisey G, Lelong G, Reby A M. Écrits, ou l'invention de la musique spectrale[J]. (No Title), 2008.
- [7] Rouard S, Massa F, Défossez A. Hybrid transformers for music source separation [C]//ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2023: 1-5.
- [8] Kim M, Choi W, Chung J, et al. KUIELab-MDX-Net: A two-stream neural network for music demixing[J]. arXiv preprint arXiv:2111.12203, 2021.
- [9] Kutluay E, Winner H. Validation of vehicle dynamics simulation models – a review [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(2): 186-200.
- [10] Song Y, Kim W, Yun M H. Auditory experience in vehicles: A systematic review and future research directions[J]. Heliyon, 2024, 10(15).

五、其他

- [1] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 37153-2018 电动汽车低速提示音[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [2] Galiev R. Engine Sound Modeling: From Sampling to Granular Synthesis in Wwise[EB/OL]. (2025-05-09)[2026-02-13]. <https://www.audiokinetic.com/en/blog/engine-sound-modeling-from-sampling-to-granular-synthesis-in-wwise/>.
- [3] Audiokinetic. 互动音乐[EB/OL]. (2026-01-12)[2026-2-16]. <https://www.audiokinetic.com/zh/learning/learn-wwise/interactive-music/>.
- [4] Uzer C. Naming Convention Best Practices[EB/OL]. (2025-01-23)[2026-03-05]. <https://www.audiokinetic.com/en/blog/naming-convention-best-practices/>.
- [5] 全国汽车标准化技术委员会(SAC/TC 114).纯电动乘用车技术条件:GB/T 28382-2012[S].中国标准出版社,2012.

附录

问卷调查截图与链接：

<https://v.wjx.cn/vm/YQpclgk.aspx#>

纯电汽车音效用户需求调研问卷

尊敬的用户，您好

本问卷旨在了解您对纯电动汽车声音设计的看法和需求，您的意见将为未来汽车声音设计提供重要参考。问卷采用匿名方式，所有信息仅用于学术研究。感谢您的支持！

预计用时：8-10分钟

第一部分：基本信息（7题）

• Q1. 您的性别是？

☐ A. 男

☐ B. 女

☐ C. 其他/不便透露

• Q2. 您的年龄段是？

☐ A. 18-25岁

☐ B. 26-35岁

评价量表链接：

链接：<https://pan.baidu.com/s/1B34H0mvW4k2-Ymzfortnxg> 提取码：gj5e

主客观评价实验系统

首页 实验一：AVAS评价 实验二：声浪评价 实验二：互动音乐 数据分析 数据管理

纯电汽车个性化主动声音设计 - 主客观评价实验

本系统用于收集主观听感评价数据，请在专业录音棚环境下完成评价。评价前请确认已通过纯音听力筛查（250-8000 Hz 阈值 ≤20 dB HL）。

实验一：AVAS音效主观评价

评价对象：声景融合、科幻电子、音乐氛围三种AVAS风格

评价维度：警示性、辨识度、舒适度、清晰度、场景融合性

方法：9点SD量表 + 配对比较

时长：约25分钟

开始实验一

实验二A：声浪模拟评价

评价对象：运动跑车、电子科幻、音乐氛围三种声浪风格

评价维度：动力感、舒适度、氛围感、豪华感、匹配度

方法：9点SD量表 + 量值估计

时长：约20分钟

开始实验二A

实验二B：互动音乐评价

评价对象：歌曲类、乐曲类两种互动音乐模式

评价维度：舒适度、氛围感、匹配度、沉浸感、情感激发

方法：9点SD量表

时长：约15分钟

开始实验二B

被试基本信息登记

被试编号 性别 年龄 职业背景

驾龄（年） 听力筛查

保存被试信息

车辆定制化动力模型示意代码：

```
// AEVWheeledVehiclePawn.h
// 继承自 AWheeledVehiclePawn，用于纯电动车辆仿真配置

#pragma once

#include

"CoreMinimal.h"

#include

"WheeledVehiclePawn.h"

#include

"ChaosWheeledVehicleMovementComponent.h"

#include

"AEVWheeledVehiclePawn.generated.h"

UCLASS(config = Game, BlueprintType)
class CHAOSVEHICLES_API AAEVWheeledVehiclePawn : public AWheeledVehiclePawn
{

GENERATED_UCLASS_BODY()
```

```
}; //

AEVWheeledVehiclePawn.cpp

// 在构造函数中对 Chaos 载具的引擎与变速箱参数进行定制化配置
// 以模拟纯电动车辆的即时扭矩响应与单速直驱传动特性

#include "AEVWheeledVehiclePawn.h"

#include

"ChaosWheeledVehicleMovementComponent.h"

AAEVWheeledVehiclePawn::AAEVWheeledVehiclePawn (

const

FObjectInitializer& ObjectInitializer)

:

Super(ObjectInitializer)

{

    UChaosWheeledVehicleMovementComponent* VehicleMovement =

        CastChecked<UChaosWheeledVehicleMovementComponent> (

            GetVehicleMovementComponent () );

    // —— 引擎参数配置（模拟电机大扭矩、平坦扭矩曲线特性） ——

    // 最大输出扭矩设为 450 N·m，对应电机峰值扭矩输出能力

    VehicleMovement->EngineSetup.MaxTorque = 450.0f;
```

```
// 扭矩衰减斜率设为极小值，使全转速范围内扭矩曲线趋于平坦
// 区别于传统内燃机的峰值区间特性，电机可在低转速即输出额定扭矩
VehicleMovement->EngineSetup.TorqueRolloff = 0.05f;

// —— 变速箱参数配置（模拟单速直驱传动） ——

// 档位数设为 1，取消多挡换挡逻辑，消除换挡顿挫感
VehicleMovement->TransmissionSetup.ForwardGears.SetNum(1);
VehicleMovement->TransmissionSetup.ForwardGears[0].Ratio = 8.28f;

// 传动效率设为 0.97，接近电机直驱系统的机械损耗水平
VehicleMovement->TransmissionSetup.TransmissionEfficiency = 0.97f;

// —— 制动参数配置（模拟单踏板能量回收减速感知） ——

// 最大制动减速度设为 0.9 g ( $\approx 8.829 \text{ m/s}^2$ )
// 综合模拟摩擦制动与能量回收产生的协同减速效果
VehicleMovement->BrakeSetup.BrakeDeceleration = 8.829f;
}
```

周迪关于人工智能使用的声明

须对人工智能辅助生成内容做出客观、全面、真实的说明，须明确说明在文中的确切位置，AI 工具信息（名称、版本等）、详细使用过程以及作用。可能的应用包括但不限于用 AI 工具收集和分析数据、制作图片或论文中的图形元素、生成程序算法、辅助作品设计、生成文本或进行文字润色等。**如未按照实际情况予以说明，则视为违规使用。**

本人在学位论文（设计）的撰写过程中，使用了人工智能工具来辅助论文撰写等工作。具体包括：

1.第二章第二节的歌曲类音乐交互示例代码，使用 Claude 工具 4.6 版本生成 Python 代码，源码并未展示在论文中，论文中的图 2.16 为总结代码中的关键逻辑，由本人所画。

2.第三章第四节第二条第三款的载具物理参数定制中，使用 Claude 工具 4.6 版本在原有 C++代码的基础上定制化修改了代码内容，示例代码已在附录展示，文中的文字描述全由我本人撰写。

3.第四章第二节第二条的评价量表系统，使用 Claude 工具 4.6 版本制作的交互性网页评分系统，主观实验使用该系统收集数据，评价量表文件和截图已在附录中展示，该系统只负责收集和统计数据。

研究生（本人签字）：

年 月 日

致谢

首先非常感谢我的导师贾小龙老师，没有贾老师的知遇之恩就没有现在读研的自己；其次是要感谢白依凡师姐，我能考入研究生多亏了白师姐的辅导，我能进入汽车行业实习也是白师姐引荐，不管是工作还是学习，白师姐出现得太及时，您真是我的贵人啊！然后是要感谢我的同学们，我和姚慧君同学一直在讨论论文修改的事；王子凯同学提供的电脑帮我完成毕业设计；还有我的两个舍友，王子康和武浩文，研究生生涯中宿舍的氛围一直都很好；任家骏同学我们经常一起讨论专业知识；还有李士禾同学，有什么问题都会问我们的阿宝。

最后，我最应该感谢的是我的最爱黄鲜，没有鲜鲜就没有现在如此坚定的自己，你给了我太多，不论是情感还是物质，你是那么的支持我，相信我可以完成我的学业，相信我可以在家乡找到一份工作，相信还是学生的我，既没有收入也没太多时间，但是依然坚定不移地走下去。我相信不论之后是否从事选题相关工作，我们一定会一起努力，向着我们最向往的生活一起走下去！