

## 平行音乐：大模型时代的人机混合音乐创演

倪清桦<sup>1</sup>, 鲁越<sup>2</sup>, 林飞<sup>1</sup>, 黄峻<sup>1</sup>, 王艺瑾<sup>3</sup>, 林伟华<sup>4</sup>, 王飞跃<sup>1,5</sup>

(1. 澳门科技大学, 澳门 999078;

2. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

3. 加州大学洛杉矶分校, 美国 洛杉矶 90095;

4. 亚利桑那大学, 美国 图森 85721;

5. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 随着声音艺术等垂直领域基础模型的迅速发展, 人工智能与音乐创作表演呈现愈发融合的趋势。面向音乐创演的流程与需求, 提出新型音乐创演框架——平行音乐系统, 该系统基于平行系统理论与人工社会、计算实验和平行执行方法, 通过模拟真实世界的音乐创演环境, 构建高度逼真的虚拟音乐创演场景, 在虚拟和真实音乐系统间实现实时无缝交互, 设计大模型时代音乐创演的人工系统、计算实验、平行执行各环节技术路线, 形成由自然人、数字人、机器人组成的人机混合音乐创演团队。阐述了平行音乐的理论框架和关键技术, 分析其在现代音乐领域中的创新意义和潜在价值, 并探讨了平行音乐在乐曲生成和音乐治疗等场景中的应用案例。旨在利用大模型时代的人工智能技术赋能传统音乐创作路径, 推动音乐创演的技术革新进程, 释放音乐家的艺术创新潜力, 以期为新时代音乐创演提供新视角与启发。

**关键词:** 平行系统; 大模型; 平行艺术; 平行音乐; 平行人; ACP方法

**中图分类号:** TP39

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-6652.202423

## Parallel music: human-machine hybrid music creation and performance in the era of large models

NI Qinghua<sup>1</sup>, LU Yue<sup>2</sup>, LIN Fei<sup>1</sup>, HUANG Jun<sup>1</sup>, WANG Yijin<sup>3</sup>, LIN Weihua<sup>4</sup>, WANG Fei-Yue<sup>1,5</sup>

1. Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China

2. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

3. University of California, Los Angeles, Los Angeles 90095, USA

4. University of Arizona, Tucson 85721, USA

5. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** As foundational models in specialized fields like sound art have rapidly advanced, the convergence of artificial intelligence with music creation and performance has become increasingly pronounced. A novel framework for music creation and performance called the parallel music system was proposed. Grounded in parallel systems theory and the artificial system, computational experiments, parallel execution (ACP) approach, this system stimulates the real-world music creation and performance environments to build highly authentic virtual scenarios. It facilitates real-time, seamless interactions between the virtual and real music systems and outlines the technological strategies for music creation and performance in the era of large models, incorporating a hybrid team of humans, digital beings, and robots. Additionally, the theoretical framework of parallel music and its critical technologies are discussed, the innovative contributions and potential

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-05-27

通信作者: 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 澳门特别行政区科学技术发展基金项目 (No.0093/2023/RIA2)

**Foundation Item:** The Science and Technology Development Fund of Macao Special Administrative Region (No.0093/2023/RIA2)

in the modern music field are evaluated, the applications in scenarios like music generation and music therapy are examined. The objective is to harness the emerging AI technologies of the large model era to enhance traditional paths in music creation, drive technological advancements in music performance, unlock the creative potential of musicians, and offer fresh perspectives and inspirations for music creation and performance in the new era.

**Key words:** parallel systems, large models, parallel arts, parallel music, parallel human, ACP approach

## 0 引言

在文化与艺术发展进程中, 音乐是文化表述与社会互动的核心媒介之一。自古至今, 音乐不仅具备娱乐属性, 而且更深层次影响人类的情感和精神世界, 体现人类智慧和情感的深度。自史前部落的仪式音乐到现代的复杂交响乐, 音乐的发展不断映射出人类文明的进步和社会变迁。作为一种独特的沟通方式, 音乐具有跨越语言和文化界限的能力, 实现情感共鸣和理解<sup>[1]</sup>。此外, 通过激发听者的情感反应, 音乐也已显示出其对心理健康具有积极影响<sup>[2]</sup>。音乐一直是连接人类情感与历史经验的桥梁, 而每一种音乐风格的演变都紧密地与其时代的社会环境、技术革新和文化价值观相互作用, 共同塑造了一个多元丰富的世界音乐图景。这种多样性和普遍性反映了音乐在全球文化中不可或缺的地位, 也突出了其作为人类情感和文化交流媒介的重要性。

进入现代, 随着科技的发展和音乐制作技术的进步, 音乐创作和表演的范式也经历了显著的变革。数字音乐的兴起, 使音乐家能够通过数字工具创作出传统乐器无法实现的声音<sup>[3]</sup>, 音乐的风格和表达形式被极大地扩展, 这种技术辅助下的新音乐艺术表现形式, 推动着音乐创新的边界。在更进一步的技术发展过程中, 音乐家们可以在全球范围内与其他艺术家协作, 通过数字音频工作站和软件合成器, 创作出具有多文化特色的音乐作品。这种进步不仅提升了音乐的制作效率, 也为音乐教育和普及提供了新的途径。人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术在音乐创作过程中扮演愈发重要的角色, 算法不仅能生成旋律和节奏, 还能通过机器学习 (machine learning, ML) 模型来分析和预测音乐趋势, 为音乐家提供了更加深入的创作支持和灵感来源。这些技术的集成使得音乐产业的发展突破了传统界限, 朝着更为多元化和互联的方向快速进步。然而, 随着AI技术水平和音乐创演技术需求的不断提升, 如何突破对现有技术辅助范围单

一、辅助层次不够深入等局限至关重要, 亟须进行AI与音乐创演的理论交互与技术融合研究, 利用AI技术实现音乐创演全流程辅助。

在基础模型等新兴人工智能技术飞速革新的背景下, 本文基于平行系统理论与人工社会、计算实验和平行执行 (artificial system, computational experiments, parallel execution, ACP) 方法<sup>[4-5]</sup>, 提出了虚实结合的平行音乐系统。该框架旨在通过人工系统、计算实验和平行执行3个组成部分, 构建一个高度集成的音乐创作和表演系统。通过创建高度逼真的数字复制来模拟真实世界的音乐创作环境, 在虚拟和现实之间将建立一个无缝的交互系统, 优化音乐创作和表演的过程, 提高艺术作品的质量和表现力。

本文结构如下: 第1节阐述音乐创演的范式与现状、人工智能驱动的音乐创演; 第2节介绍平行系统和ACP方法及其与艺术领域融合下的平行艺术理论体系; 第3节提出平行音乐架构, 详细阐述平行音乐基于ACP方法的理论基础和技术实现, 分析其在现代音乐领域中的创新意义和潜在价值; 第4节介绍平行音乐在乐曲生成和音乐治疗的应用前景, 并展示平行音乐系统在实际应用中的局部表现和效果; 第5节总结全文, 展望平行音乐框架面临的挑战和未来发展方向, 以及如何进一步推动音乐产业的技术革新和文化创新。

## 1 音乐创演的范式与现状

### 1.1 传统音乐创演

#### 1.1.1 音乐创作

音乐创作过程常常既结构化又灵活多变。以古典音乐创作为例, 其创作过程往往需要融合专业技术技巧与情感直觉的多方面艺术能力。为了保证艺术创作质量并实现艺术表现统一, 音乐创作者需要应对音乐理论与创作灵感的平衡、音乐作曲与演奏等多方合作与协调等挑战。

知名作曲家Koepke<sup>[6]</sup>提出作曲流程可分为构思、成熟和实现3个主要阶段。作曲家们在创作的

多个阶段中游走，每个阶段都呈现出独特的挑战，需要艺术愿景与系统化执行的平衡。构思阶段包括认知情感复杂性和建立表达框架，决定演奏媒介、音乐形式及高潮位置。成熟阶段涉及发展作曲素材及建立连续性，将素材最佳地组合在时间维度上。实现阶段则将构思转化为具体音乐元素，完成草稿并修订，引入听众和创作目的的变量，最终完成曲子的创作和传达。

与强调结构化作曲的Koepke<sup>[6]</sup>不同的是，作曲家Erickson<sup>[7]</sup>强调直觉在作曲中的重要性，直觉与理性相辅相成。他通过环境声音汲取灵感，认为作曲主要是在创作环境的声音，并强调作曲家与演奏者合作的重要性。此外，作曲流程不仅包括技术性的步骤，还融合了大量的直觉和情感因素。作曲家需要在灵感和理性之间找到平衡，从而创作出富有表现力的音乐。

如今，越来越多的作曲家在完成作品后倾向于与演奏者共同练习，并根据反馈进行深入讨论，以确定并调整乐谱。Hulse<sup>[8]</sup>强调了作曲家与乐手在创作中协作的重要性，认为演奏者不仅是灵感和创意的重要来源，还在提升作品艺术表现力方面发挥关键作用。他建议作曲家了解演奏者的特长和偏好，探讨他们希望演奏的音乐类型，并鼓励演奏者提出创意，以增强作品的艺术个性。在理想情况下，演奏者应参与创作过程，这不仅丰富作品内容，还能显著提升创作过程的顺畅性和有效性。

然而，作曲家和演奏者之间的这种紧密合作也面临一些实际挑战。作曲家若对乐器的全面了解不足，可能会导致谱写的曲子有多种音域问题，例如音域受限、音区不均衡、音符超出实际音域范围以及音域跨度过大。有些作曲家创作的曲子中可能包含一串不顺手的音符，演奏起来会显得不协调。此外，乐器设计存在局限，它的固有缺陷会导致某些音符的音色欠佳<sup>[9]</sup>。因此，作曲家在创作过程中需充分考虑乐器的局限性，应深入了解乐器的物理特性，以便准确标记乐谱并且完成作品<sup>[10]</sup>。总之，同时需要与演奏者密切合作了解演奏技术与乐器特性，确保作品的可演奏性和艺术完整性。

### 1.1.2 音乐演奏

基于已完成的音乐曲谱，演奏排练也是音乐创演的另一重要环节，其决定音乐呈现的最终效果与音乐交互体验。然而，排练过程中会面临在多维背景共存的背景下，于同一空间排练的灵活性问题。例

如，当多个成员的排练时间无法协调时，这种时空的错位增加了排练的难度。此外，排练和演出前的突发情况，如健康问题、交通延误和家庭紧急情况，也可能导致成员无法按时参加排练或演出。面临此类情况时，乐团需通过安排替补成员、调整排练计划和保持良好沟通，确保排练和演出的顺利进行，而这对乐团的灵活应急性提出了更高要求。

除了排练对环境条件和团队协作的要求之外，顶尖乐团的选拔标准也严格，音乐家需通过多轮试奏和面试，在选拔中展现卓越的技术和艺术表达能力<sup>[11]</sup>。顶尖乐团在全球范围内挑选优秀音乐家，导致每个职位竞争激烈。这种选拔要求演奏者不仅熟练掌握乐器，还需深刻理解音乐作品并展现出出色技巧，从而确保乐团的艺术水平，这对于许多音乐家是巨大的挑战。选拔过程中，高强度竞争和严格考核带来的心理压力很大程度上影响演奏家的表现。除了选拔的压力之外，音乐界的就业环境也容易让音乐家感到失望和挫败，因为顶尖乐团的职位稀少且通常为终身制，即使才华横溢的音乐家也可能因机会有限而难以进入。

在乐团的高标准和高压力的环境下，音准问题成为乐团表现中的一个关键环节。Timm<sup>[12]</sup>深入探讨乐团音准问题，揭示个体音高感知差异、环境变化和乐器特性对音准的影响，强调协同工作在合奏音准调整中的重要性，指出乐团需长时间合作才能形成一致的音准，临时替补或增加新成员常导致音准不稳。此外，Timm<sup>[12]</sup>讨论了温度和湿度变化对乐器音高的影响，例如单簧管音准会因温度升高而上升，演奏者需通过调整乐器来维持音准。

为确保每位演奏者在合奏前与标准音高达成一致，演奏者常常在个人练习或分部排练中用调音器<sup>[13]</sup>。然而，在完整排练和音乐会中，依赖听觉技能和相对调音的传统做法依然占据主导地位。因为舞台上的音响环境复杂，调音器易受其他乐器的声波干扰，无法精准捕捉并校正目标乐器的音高，从而限制了调音器在现场表演中的实用性<sup>[14]</sup>。

因此，技术的引入显得尤为重要。Boulez<sup>[15]</sup>指出音乐创作必须与科学家和技术人员紧密合作。通过这种协作，音乐家能够更深入地理解和应用现代技术，为创作注入新的材料和灵感。音乐创新需要技术的支持，而技术则可以通过回应音乐家的需求和想象力来提升音乐表现的稳定性和表现力。

## 1.2 人工智能驱动的音乐创演

近年来AI技术不断发展,科技与音乐领域的融合应用势头愈发迅猛<sup>[16]</sup>。追溯至1958年,Hiller等<sup>[17]</sup>提出利用马尔可夫链伪随机生成音符的程序——“Illiac Suite”,这被认为是计算机音乐领域的开创性工作。此后,基于马尔可夫链的研究不断发展,Yanchenko等<sup>[18]</sup>探索了状态空间模型,尤其是隐式马尔可夫模型及其变体在创作浪漫主义时代古典钢琴作品中的实用性。

而后机器学习和深度学习(deep learning, DL)兴起,音乐创作和演奏过程经历了更加显著的变革。在音乐创作方面,Eigenfeldt<sup>[19]</sup>提出的生成式作曲系统利用遗传算法创造旋律和节奏短语,这些短语由智能音乐代理进行组合。Bickerman等<sup>[20]</sup>使用深度信念网络成功创造了新的爵士乐作品。Grachten等<sup>[21]</sup>展示了基于卷积神经网络进行古典音乐创作的有效性。进一步,Bretan等<sup>[22]</sup>结合深度结构化语义模型和长短期记忆网络生成音乐,展示出令人印象深刻的成果。Hadjeres等<sup>[23]</sup>开发的“DeepBach”通过对巴赫合唱团进行实验,生成了复调作品,并以令人信服的和声重现了巴赫风格。在音乐演奏领域,Widmer<sup>[24]</sup>采用深度学习和数据挖掘技术对富有表现力的音乐表演进行深入分析,揭示了音乐表演中情感表达的复杂机制及其对听众感知的影响。Thörn等<sup>[25]</sup>在音乐即兴创作领域进行了创新性的人机交互研究,设计了控制鼓手演奏参数的AI系统,该系统能够根据人类钢琴家的演奏风格自动调整鼓点,有效提高了演奏的协调性和动态表现力。这些研究不仅展示了AI在音乐领域的应用潜力,也为如何通过技术手段增强音乐表演的情感表达和互动性提供了宝贵的经验。

随着生成式人工智能(generative artificial intelligence, GAI)技术的快速发展,基于生成对抗网络、变分自编码器等生成式机器学习模型在音乐创作领域已显著提升了音乐生成的能力和质量。Dhariwal等<sup>[26]</sup>提出的Jukebox模型在原始音频生成领域取得了突破,该模型使用多尺度向量量化变分自编码器处理长时间的音频上下文,并将其压缩为离散代码。通过自回归的Transformer网络进行建模,Jukebox能够生成具有高保真度和丰富多样性的带有歌声的音乐。此外,Caillon等<sup>[27]</sup>提出了RAVE的实时音频变分自编码器,该技术通过优化编解码过程,实现了快速且高质量的音频波形合成。在另

一项突破性工作中,Wu等<sup>[28]</sup>提出了“Music ControlNet”,这是一个基于扩散模型的音乐生成模型,能够提供多种精确且随时间变化的音乐生成控制。

随着大语言模型(large language models, LLMs)技术的持续发展,其在引导音乐创作和演奏方面的开发与应用也逐渐显现。Skywork AI PTE公司<sup>[29]</sup>开发的ChatMusician1,能够通过纯文本标记器理解和生成音乐,这一过程无须依赖任何外部的多模态神经结构或额外的标记器。Agostinelli等<sup>[30]</sup>提出从文本描述生成高保真音乐的模型MusicLM,MusicLM将条件音乐生成过程视为分层序列到序列的建模任务,生成24 kHz的音乐,并在几分钟内保持一致性。Xu等<sup>[31]</sup>提出了Mozart's Touch的多模态音乐生成框架,该框架能够生成与图像、视频和文本等跨模态输入对齐的音乐。

尽管有AI技术在音乐创作中取得了显著成果,但仍存在诸如生成音乐的创意性、情感表达以及人类音乐家的协作等问题。为了进一步提升AI在音乐创作中的应用效果,提出将平行系统理论和ACP方法引入音乐行业,通过结合人工系统、计算实验和平行执行,利用虚实结合和强大的交互能力和人类的创造力,实现人机混合的音乐创作与运营模式。

## 2 平行系统与平行艺术

### 2.1 平行系统与ACP方法

平行系统理论代表了一种针对复杂社会—信息—物理系统(cyber-physical-social systems, CPSS)的系统分析与管理新方法,由王飞跃研究员于2004年提出,专注于通过构建和运用以人工社会(artificial system, A)、计算实验(computational experiments, C)和平行执行(parallel execution, P)为反馈闭环的ACP方法,模拟和理解复杂系统中的动态行为和决策过程,特别是在涉及人类行为和社会互动的系统中<sup>[32-34]</sup>。其中,人工社会旨在数字空间中基于物理世界构建高逼真度的人工系统,生成计算实验智能分析、学习这些虚拟数据,以提炼有效知识,引导智能利用提炼出的关键知识对物理与人工系统进行引导性控制。平行系统的创新在于其跨学科的方法论,将人工智能、系统科学和复杂性科学整合应用,形成了一个全面的理论和实践框架。通过这种集成方法,平行系统不仅能够处理单

一系统的行为,还能实现多系统间的协同和集成,平行系统的应用涵盖了从智能交通系统到社会计算,以及更广泛的网络社会状态的动态分析。在实践中,这一理论不仅提供了一个强大的工具来预测和模拟现实世界事件的可能结果,还能够实时调整和优化系统的运作,以达到预期的行为和性能。通过这种方式,平行系统极大地增强了决策者对复杂系统内在动态的理解和控制能力。为智能科技和系统科学的研究提供了新的方向<sup>[35-37]</sup>。此外,该理论的实际应用已在多个领域显示出显著成效,随着技术的不断进步,平行系统将在未来推动更多行业的智能化和数字化转型。此理论不仅提升了决策质量和响应速度,还通过实时模拟和反馈控制优化系统操作,适用于智能交通<sup>[38-39]</sup>、艺术理解<sup>[40-42]</sup>、医药产业<sup>[43-45]</sup>、戏剧产业<sup>[46]</sup>以及生态资源管护<sup>[47]</sup>等领域。基于平行系统的思想及其在工业与艺术领域的应用效果,本文从音乐创演现状与需求出发,进行了平行音乐系统的框架与方法设计。

## 2.2 平行艺术

艺术是人类通过多种感官媒介和表现形式进行必要信息交互的手段,历史上从绘画、雕塑到现代的电影和数字艺术,艺术一直是情感和思想交流的重要形式。近百年来,科技的发展深刻地改变了艺术领域,从摄影到数字艺术,科技不仅扩展了艺术的表现形式,也加深了艺术与观众之间的互动。

在此背景下,王飞跃研究员及其团队将平行系统理论和ACP方法拓展并融入艺术领域,提出平行艺术理论体系<sup>[4]</sup>,着眼于艺术与机器之间的深度融合,以应对艺术创作中的技术挑战,推动形成艺术创作的新形态和表现方法<sup>[35]</sup>。该体系涉及创作过程的模拟、情感表达的学习、艺术决策的优化等多维度应用<sup>[40-42]</sup>。通过建立虚拟的人工系统模拟真实世界的艺术创作环境,平行艺术允许机器在无风险环境中尝试不同的艺术创作手法,学习、模拟和实验人类艺术家的创作策略,并通过平行执行将这些学习成果应用于实际的物理艺术创作中,训练机器生成内容在不断迭代中逼近人类艺术家的创作决策和情感表达水平<sup>[48]</sup>。

平行艺术理论体系的提出,为艺术与科技的融合提供了新的视角和方法论。在人工智能技术的不断进步和创新的过程中,通过深化机器与人类艺术家之间的互动,平行艺术助力扩展艺术的表现形式和内容,提高艺术创作的社会价值和文化影响力,

有望成为推动艺术创作主流方式的关键力量。

## 3 平行音乐

基于平行系统理论与ACP方法,继平行艺术之后,平行音乐以多模态基础模型等技术驱动语言智能、算法智能与想象智能的音乐建模与生成作用,构建由机器人、自然人、数字人构成的3种平行音乐人对象,从而形成人机混合的全链路音乐创演系统。基于上述技术链条,平行音乐系统旨在提升作曲者、演奏者、指挥者的工作效率与质量,进一步释放音乐创演人员的艺术创作空间,平行音乐系统基本框架如图1所示。

平行音乐系统将现有的由单一自然人组成的音乐创演流程扩展为人机混合与虚实结合的平行音乐创演流程。其中,机器人实现与真实乐曲、乐器、舞台的物理交互,是自然人创演执行环节的辅助补充、应急替补或平等合作对象;数字人对乐理、乐器、作曲、音乐人等要素进行学习与建模,在虚拟音乐系统中提供音乐创演各环节的功能辅助。借助平行系统中的机器人与数字人在音乐创演(从创作到执行)各环节的辅助功能,自然音乐人能够从繁琐的创作事务中解放精力,获得更多空间聚焦于音乐创演顶层方案与艺术设计。

平行音乐系统的核心方法包括虚实音乐系统间的学习与培训、实验与评估、预测与引导等技术。学习与培训模块聚焦于训练数字人在乐理感知、乐器理解、乐曲设计等音乐创演过程的知识基础,从而为人工系统提供音乐要素及创演过程模型,并在自然音乐人创演环节中进行作曲灵感提示等辅助。实验与评估模块将利用虚拟音乐系统的分布式和并行化特性,进行音乐创演的大规模模拟执行,并根据乐理知识模型与专家音乐人的数字分身进行全流程多角度的创演质量评估,从而给真实创演提供辅助与评估工具。预测与引导模块根据虚拟音乐系统的建模知识与推演结果,在真实音乐创演过程中进行虚实系统的动态交互,并借助机器人进行拟真演奏、人机混合创演等。

平行音乐系统将深度融合多模态感知与生成基础模型,发挥现有方法展现出的语言智能、算法智能与想象智能水平。一方面,利用基础语言模型在自然语言沟通、文本驱动控制等语言方面的能力,给自然音乐人提供高效便捷的人机交互媒介,降低音乐人与平行音乐系统的协同门槛。另一方面,利

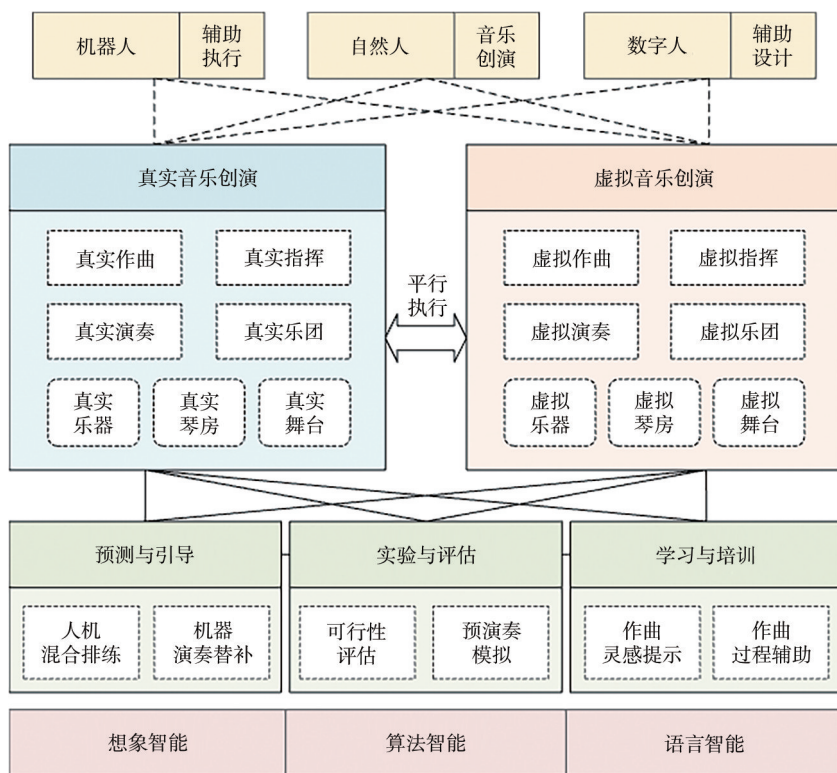


图1 平行音乐系统基本框架

用多模态感知模型在音视频与生物信息等多模态信息上的计算能力，释放自然音乐人在音乐创演环节中的基础事务处理压力，提升音乐人在艺术创作上的精力投入度与专注度。最后，结合生成式基础模型展现的音视频多模态上的想象智能，在音乐创演全链路中提供作曲灵感、作曲建议及演奏辅助等技术支撑。

平行音乐系统运行流程如图2所示，主要包括人工系统、计算实验和平行执行3部分。首先，在人工系统环节，对音乐创演流程中的乐理、曲谱、乐器、音乐人和舞台等多要素构建虚拟对象，并建立对象间物理空间交互模型，提供与真实音乐创演场景一一对应的虚拟音乐创演系统；然后，在平行音乐的计算实验环节中，基于多模态基础模型、人工智能代理、GAI等工具链对真实音乐创演的要素特性与技术流程进行建模，并在虚拟音乐创演系统中实现多场景创演的并行推理，使平行音乐系统获取充足的音乐创演技能；最后，在平行音乐的平行执行环节中，基于自然语言、音视频、生物信息等多模态交互媒介，辅助作曲者、演奏者与指挥者等多角色进行真实创演，在乐曲创造、完善、演奏的全流程中实现真实与虚拟音乐系统的平行执行与

优化。

### 3.1 人工系统

基于平行系统理论与ACP方法，平行音乐的人工系统旨在对真实音乐创演过程进行建模，为计算实验与平行执行中对音乐创演过程的高精度推演提供数据与模型支撑，平行音乐人工系统组成结构如图3所示。根据音乐创演的要素组成，平行音乐主要从建模、感知和存储3个方面进行人工系统构建。

#### 3.1.1 要素建模模块

虚拟音乐系统的要素建模模块旨在对音乐创演中的核心要素进行数字模型构建，包括乐器、乐曲、乐手、舞台等对象。

乐器模型。虚拟音乐系统对音乐创演流程需要的琴类、管类、弦类、鼓类等多种乐器进行声乐建模，模拟乐器的响应机制、奏响方法、音域音色、情绪色彩等多角度信息，作为虚拟乐曲演奏的便捷调用单元，并提供乐曲演奏可行性的验证接口。虚拟音乐系统结合精密测量、音频采集、专家演奏者知识等多方面信息联合建立乐器模型，综合纳入环境温度、演奏时间、型号材质等影响因素，从而提升构建的动态乐器模型的准确性与还原性。

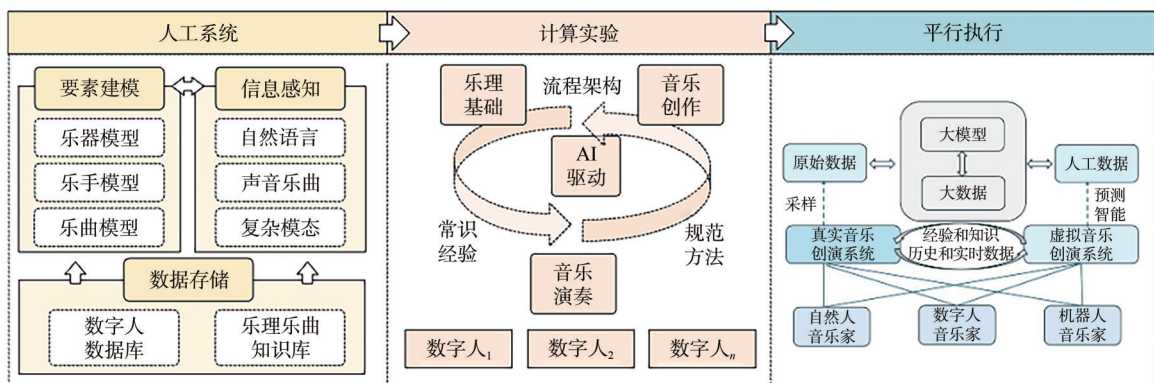


图2 平行音乐系统运行流程

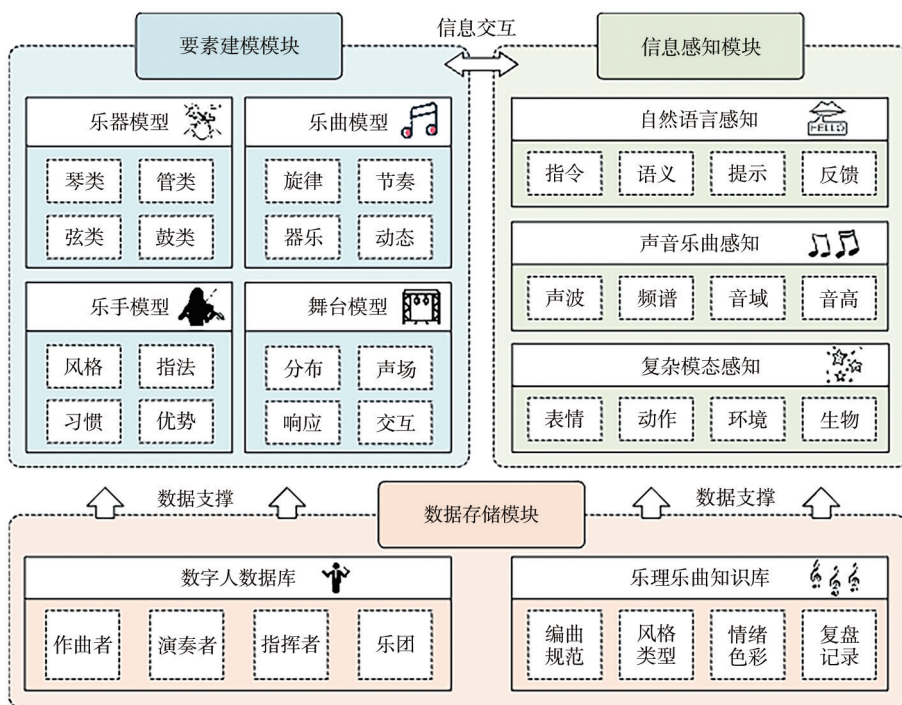


图3 平行音乐人工系统组成结构

**乐曲模型。**通过经典作曲家、知名作曲人、广泛乐曲库的多渠道信息来源，构建包括旋律、节奏等多轨道乐曲模型。基于大规模基础模型的序列建模能力，利用乐曲补全和预测等任务，并融合经典音乐领域书籍，训练模型掌握基本乐理知识。在此基础上，通过知名曲目与专用曲库的数据微调，构建风格、时代、类型可控的乐曲模型，从而为乐曲生成、灵感提示等平行音乐上层功能提供模型支撑。

**乐手模型。**虚拟音乐系统对各类型器乐演奏者进行演奏方法、指法习惯、个性特点等全方面信息建模，利用乐手演奏记录进行数据拟合与预测，使模型学习不同乐手个性化演奏知识。通过构建精准

的乐手模型，能够提供虚拟排练乐手、应急替补器乐手、人机混合乐团的运行支撑。同时，个体化乐手模型也将提升乐曲针对性优化的便捷性，拓宽真实乐手技能训练的反馈渠道，提供更多乐团成员间跨时域与跨空域合作的可能性。

**舞台模型。**虚拟音乐系统将基于真实舞台数据进行乐器分布、声波响应、听者声场等信息建模，构建包括乐器、乐手、指挥、观众在内的虚拟舞台模型。利用真实排练与演出数据的高精度采集，舞台模型能够实现多种信息的推理预测，包括乐器响度水平、观众声场分布、指挥节奏特性等，从而为虚拟音乐系统的音乐创演提供拟真环境，并在实际舞台演出过程中实现数字模型的实时

更新。

### 3.1.2 信息感知模块

虚拟音乐系统的信息感知模块旨在提供平行音乐系统运行所需的感知媒介, 主要包括自然语言、声音乐曲和复杂模态3个方面信息感知。

自然语言感知。基于基础语言模型的语言智能, 虚拟音乐系统提供自然语言形式的信息输入与输出方式, 从而为自然音乐人提供便捷的信息交互媒介。乐曲灵感提示、乐曲生成、演奏反馈、人机混合排练等多种任务能够通过类人化的自然语言唤起, 并借助乐理基础知识的学习与建模, 精准识别自然音乐人控制语句中的领域专有词汇, 实现音乐领域专用概念的精准感知。

声音乐曲感知。为了进行乐器、乐曲的多要素建模, 虚拟音乐系统基于高精度声音感知设备, 实现乐器、乐团、舞台多级别的原真声音采集。对采集获得的声波及频谱信息进行乐器分离, 与演奏乐曲的多轨信息进行联合分析, 从而提供演奏乐器表现、还原度、感染力等多角度评估。实时高精度的乐曲感知也给人机混合的音乐演奏排练、机器人应急演奏替补提供了高解析力的信息基础, 从而保障数字音乐人在演奏执行中的响应速度与精度。

复杂模态感知。在自然语言和声音乐曲的基本信息感知基础上, 虚拟音乐系统也将对人类表情、肢体动作、场馆环境、生物信息等多模态因素进行感知, 从而提供便捷的音乐创演所需的多模态信息感知渠道。通过多模态复杂信息感知, 虚拟音乐系统能够实现听众观感评估、指挥意图识别、乐手状态分析等多种音乐创演的辅助功能, 并为平行音乐的计算实验与平行执行环节提供信息支撑。

### 3.1.3 数据存储模块

虚拟音乐系统的数据存储模块旨在提供平行音乐系统的数据支撑, 为乐理乐曲知识、各角色数字人建立体系化数据与高精度模型。

乐理乐曲知识库。为了实现高精度的音乐创演辅助功能, 虚拟音乐系统学习乐理规则与经典乐曲的高质量知识, 形成可以根据风格、类型、情绪等信息便捷筛选的音乐知识图谱。同时, 音乐知识图谱将根据乐团排练与演出曲目进行知识实时更新, 能够实现经典乐曲条目提取与近期乐曲记录复盘等多种查询和总结功能。在平行音乐系统的执行过程中, 虚拟音乐知识库将实时根据真实音乐信息采集进行知识库的信息更新。

数字人数据库。虚拟音乐系统为音乐创演过程中的作曲者、演奏者、指挥者多种角色建立数字人模型, 并针对数字人个体在时间、乐曲类目等维度上生成对应的数字人子版本, 形成从经典名家到现代乐团个体的大规模数字人数据库。利用数字人带有的作曲偏好、演奏风格等信息, 能够提供特定数字人风格的作曲推荐和演奏建议, 并为机器人的演奏执行提供数字人核心支撑。基于精细表征的数字人数据库, 人机混合的音乐创演团队能够实现快速创建与调整, 从而提升音乐演奏排练灵活性和舞台演出鲁棒性。

## 3.2 计算实验

计算实验的设计基于人工系统, 使得在虚拟环境中测试智能体的交互与组合成为可能。该实验方法通过模拟代替现实系统中的各种元素, 允许乐曲创演策略的计算和评估过程在无风险环境中进行。此外, 计算实验突破了传统研究方法在知识与经验积累上因重复实验的困难所遭遇的局限<sup>[49]</sup>。该实验方法在强调理论与实际应用之间的桥梁作用的同时, 为音乐家提供了安全可控的环境, 使他们能够在其中探索并得到最优乐曲创演方案。

计算实验框架及交互方式如图4所示。在平行音乐系统中, 人工系统与计算实验模块间的交互主要通过应用程序接口(application programming interface, API)和脚本执行等技术手段实现, 这些技术确保了信息在系统中的高效传输与处理。API作为一种强大的中介软件, 允许不同软件组件和服务之间进行精确、安全的通信。通过这些API, 系统可以无缝地整合和管理大量数据输入和输出, 同时保持响应速度。脚本执行则提供了自动化的处理能力, 使得重复性和复杂的操作可以快速、无误地完成, 极大地提高了工作效率。

计算实验涵盖了音乐创作和演奏过程中所需的各类知识与智能组件, 这些组件充分利用了丰富的人类知识库资源。在乐理基础方面, 系统提供了从基本音阶、和弦构建到复杂和声理论的全面引导。音乐创作流程组件则引导用户从创意激发到作品完成的每一步, 包括旋律构思、节奏设计和声部编配等, 以支持从简单乐曲到复杂交响作品的创作。系统的架构设计考虑不同演奏者的需求, 提供了适用于个人音乐家、乐队以及大型交响乐团的定制化解决方案。音乐演奏组件则包括了演奏技巧的指导、表演准备和舞台表现等, 这些都是为了提升演奏质

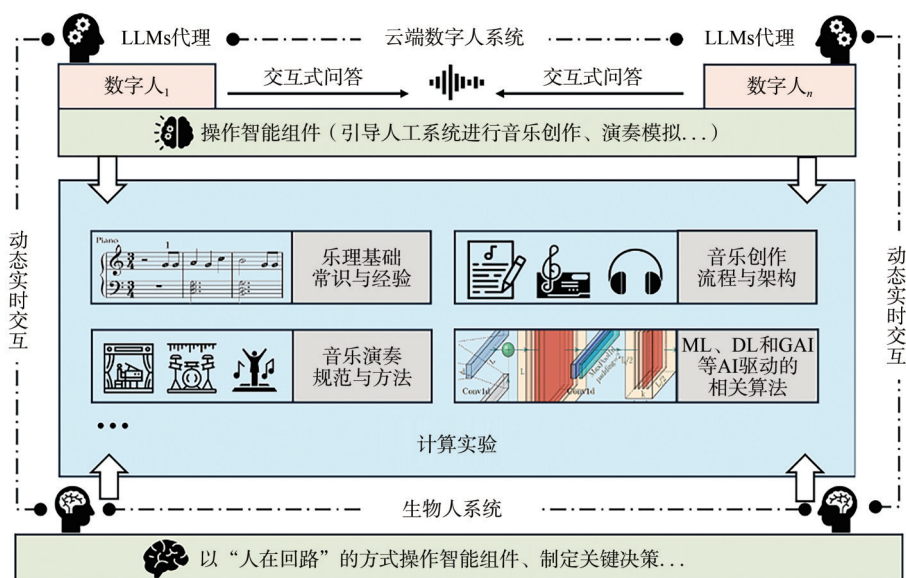


图4 计算实验框架及交互方式

量和观众的接受度。此外，系统还整合了先进的机器学习、深度学习和GAI技术。这些智能算法工具不仅支持自动音乐生成，还能进行风格模仿、情感表达分析和创新元素的插入，从而极大地丰富音乐的表现力，增强创新性。例如，深度学习技术可以分析历史著名作品，学习其独特风格并在用户的创作中复现相似风格。这种丰富的知识和技术整合，使平行音乐系统不仅能支持专业音乐人的创作和演出，还能为音乐教育和业余爱好者提供实用的支持，推动音乐创作的普及与创新。

在平行音乐计算实验平台中，数字人为平台主力人员，通过集成到云端的LLMs实现智能化。这种高度自动化的AI充分发挥了其在音乐创作和演奏中的技术潜力，能够根据人工系统提供的详尽场景指导进行计算实验。同时，利用复杂的交互式问答系统，数字人可以精确地调整实验参数，并优化实验指导的方向和精度，从而提高实验结果的可靠性和实用性。现今华为音乐采用的基于Hadoop分布式计算架构的音乐推荐服务的系统，能够有效管理和处理来自全球数百万用户的大量数据，并根据不同场景和时间动态生成个性化音乐推荐，其分布式计算的应用在提高数据处理效率的同时，增强了系统的可扩展性，提升了容错能力<sup>[50]</sup>。在此基础上，平行音乐的计算实验平台通过整合数字人技术及意图识别功能，进一步提升推荐系统的个性化和精准度。数字人利用AI算法分析用户历史数据和行为模式，结合意图识别功能深入理解用户的即时

需求和偏好。这种深层次的数据分析和处理，使得推荐系统能够更精确地匹配用户的音乐口味和情感状态，从而提供更加贴心和个性化的音乐体验。此外，系统的高效数据处理能力允许它模拟人类的决策过程，动态地适应用户的情感和环境需求。这种模拟基于算法分析用户的行为和偏好，同时考虑天气、时间段和社交环境等外部因素，从而在适当的时刻推荐最合适的音乐，优化用户体验和满意度。

与数字人相辅相成的是生物人，主要由专业的音乐创作和演奏人员组成。专业人员依据人工系统的演化需求提供关键的计算实验指导，涉及操作高级智能组件和制定关键的音乐创作及演奏决策。他们的专业知识和人类直觉对于确保音乐作品的艺术性和技术执行至关重要，尤其是在处理复杂的音乐表达和细微的情感转换时。此外，系统内生物人与数字人之间的实时动态交互，确保了计算实验能够在AI的高效运算和人类创意的深度洞察之间找到平衡。这种“人在回路”的模式，通过形成闭环的反馈机制，不仅加强了计算实验的自适应能力，而且提升了整个系统的决策支持效率和资源分配的优化。

### 3.3 平行执行

平行执行可以被视为人工音乐系统与实际音乐系统之间的互动，这是平行音乐系统发挥作用的具体形式。基于对人工音乐系统的设计，平行执行在平行音乐系统中的实现是多方面的，平行执行引导

下的优化闭环如图5所示，主要包括以下5个方面。

(1) 现实环境/人工环境：在音乐创作和演奏过程中，各种环境数据通过分布在音乐厅和演奏场所的传感器和物联网设备进行收集和上传。人工音乐系统根据这些数据定期更新人工环境的状态，以确保对实际情况的逼真模拟。

(2) 现实用户/人工用户：平行执行旨在将现实世界中的需求映射到人工音乐系统中。一旦现实用户（如作曲家或演奏者）向音乐系统发送请求，人工音乐系统将同步获得该请求的副本并创建相应的任务。此外，人工用户可以生成现实中不存在的创作和演奏任务，以提供不同的体验并拓宽决策者的能力边界。

(3) 现实事件/人工事件：物理音乐系统的运行伴随着一系列计划内或计划外的事件，这些事件可以通过媒体、固定监控设备和社交网络获取。这些现实事件也将在人工音乐系统中被构建和模拟。与用户的平行执行类似，人工事件的类型、时间和地点比现实事件更多，可帮助平台和演奏者了解不同的场景。

(4) 现实演奏者/人工演奏者：现实演奏者和人工演奏者之间的平行执行基于物联网和演奏者社交网络。在每个时间间隔内，现实演奏者通过LTE

或蜂窝网络上传他们的位置、演奏进度和其他必要信息，这些信息将用于在人工环境中创建他们的镜像。通过不断获取这些真实数据，人工音乐系统能够对现实演奏者的演奏轨迹进行短期预测、模拟和反馈校正。反之，人工演奏者也可现实演奏者提供演奏路径和任务建议，以最大化后者的收益。

(5) 现实平台/人工平台：现实平台和人工平台都建立在云上，可轻松地相互通信和交换经验。双平台之间的平行执行旨在优化和支持物理音乐系统的决策，例如参与者选择、用户激励和演奏调度。平行博物馆中的人工系统的重要功能是提供一个与实体博物馆相对应的虚拟博物馆，用于智能代理进行多种博物馆业务的模拟和训练，并提供实体博物馆的数字映射，便于实现博物馆中复杂业务的便捷管理。

平行执行结合人工的“大”数据和现实的“小”数据，使大量的先验经验和知识能够在物理音乐系统和人工音乐系统之间实时共享。通过平行训练、平行学习、平行验证、平行评估和平行优化，物理音乐系统和人工音乐系统的场景学习、认知和决策能力可以实现持续改进和双向进化。

通过实体组织与虚体组织之间的平行互动，特别是数据（经验）驱动与知识（规则）驱动同时进

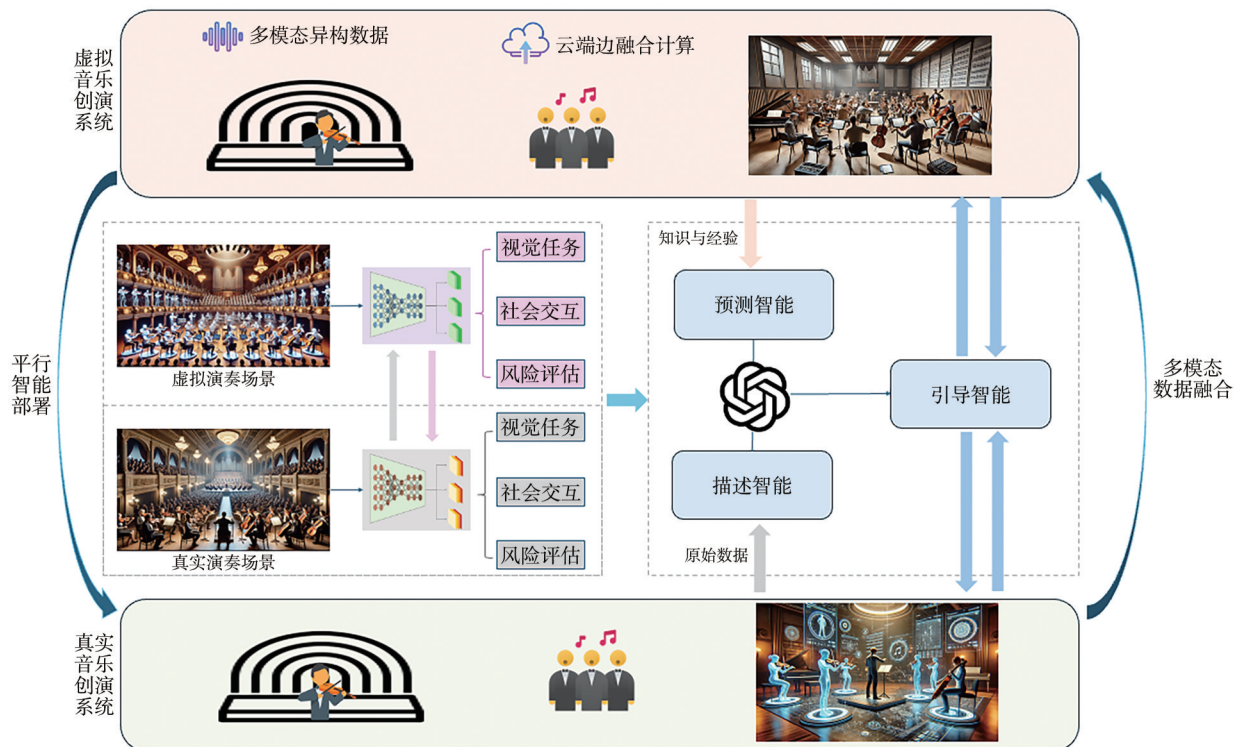


图5 平行执行引导下的优化闭环

行的平行驱动,虚拟执行与实际实行同时进行的平行执行,虚实之间的双反馈和双闭环得以实现。平行执行的核心理念是实现基于3个世界(过去、现在、未来)的广义循环因果,即未来影响过去,过去影响现在,现在影响未来。在平行音乐系统中,平行执行通过虚实互动实现对音乐创作和演奏过程的高效精准管控。数字人通过虚拟音乐系统进行乐理、乐曲设计、演奏技巧等方面的学习和培训,虚拟音乐系统提供了一个高仿真的学习环境,使数字人能够反复练习并掌握复杂的音乐技能。机器人则在虚拟环境中进行音乐演奏的模拟训练,以掌握应急替补和辅助演奏的技能。通过模拟各种演奏场景,机器人可以提高在实际演奏中应对不同情况的能力。实验与评估模块通过大量的人工场景进行音乐创作和演奏的实验,一方面,系统通过这些实验形成针对具体问题的解决思路;另一方面,通过评估数字人和机器人的音乐表现,建立其能力模型,为实际音乐创作和演奏提供参考。预测与引导模块根据虚拟音乐系统的建模知识与推演结果,在实际音乐创作和演奏过程中进行动态交互,例如系统可以根据作曲者的创作风格和偏好,预测可能的创作路径并提供灵感提示,在演奏过程中实时监控并优化演奏情况。通过构建高逼真度的虚拟音乐创作和演奏环境,平行音乐系统能够模拟真实场景中的各种情况,并与实际的音乐创作和演奏过程进行互动,确保数字人和机器人在虚拟环境中所学到的技能能够有效应用于实际场景。

平行音乐系统集成生物人、数字人和机器人的协同组织与管控体系,在这个体系中,数字人承担绝大多数音乐创作和演奏工作,机器人完成部分辅助和应急替补任务,生物人则负责少部分高艺术性的工作。例如,在大型音乐会的准备过程中,数字人可以负责乐曲的创作和大部分的排练,机器人则可以在虚拟环境中模拟不同的演奏场景,确保每一个细节都能完美执行,而生物人只需要在关键的艺术表现和突发情况处理时介入。在大多数情况下,由数字人和机器人主导音乐创作和演奏的自主模式;遇到异常问题时,系统会切换到生物人参与的平行模式;如果问题紧急或难以解决,则进入以生物人为主的应急模式,使系统运行回归正常。平行执行确保虚实系统的实时互动和高效协同,使作曲者能够专注于艺术创作,而系统负责具体的执行和优化工作,这不仅有效提升了音乐创作和演奏的

质量与效率,还能够根据实时反馈不断优化和调整创作和演奏策略。通过上述机制,平行音乐系统实现了虚实之间的高效互动和协同工作,推动了音乐创作和演奏过程的智能化和高效化。

## 4 应用场景

### 4.1 基于大模型的乐曲生成

现有的开源模型中,通过大规模音乐数据集进行训练的先进音频生成技术,可根据多模态输入生成相应的音乐。这些技术的特点在于模型的多样性和生成音频的高保真度,能够满足用户在不同情境下的音乐需求。

用户可以在平台上输入文字描述,如“一个轻柔的背景音乐,适合日落时的海滩场景”;上传一张日落海滩的图片;并提供一段轻柔的海浪声作为参考音频。结合这些多模态输入,音频生成模型利用多模态融合技术生成初步的背景音乐片段。然后,用户可以通过图形界面对生成的音乐片段进行微调,如调整音乐的节奏、添加特效音等。最终生成的背景音乐片段包括轻柔的旋律、海浪声的背景音效和舒缓的节奏,完美契合“日落时的海滩”的意境。

基于大模型的乐曲生成技术,影视制作团队可根据剧本或场景图生成符合情境的背景音乐,提高制作效率和音乐质量;广告公司可通过多模态输入快速生成符合广告主题和情感的音乐,增强广告吸引力和感染力;个人用户可依据自己的需求和灵感,通过文字、图片和音频输入生成个性化的音乐,满足多样化的创作需求。

这些音频生成技术和多模态音频平台展示了大模型在多模态音乐生成中的巨大潜力。通过结合先进的生成模型和用户友好的编辑平台,实现高效、便捷的音乐创作,满足用户在不同情境下的音乐需求。这一技术不仅提升了音乐创作的效率,还为音乐创作的多样性和创新提供了新的工具和方法。平行音乐系统集成生物人、数字人和机器人的协同组织与管控体系,在这个体系中,数字人承担绝大多数音乐创作和演奏工作,机器人完成部分辅助和应急替补任务,生物人则负责少部分高艺术性的工作。例如,在大型音乐会的准备过程中,数字人可以负责乐曲的创作和大部分的排练,机器人则可以在虚拟环境中模拟不同的演奏场景,确保每一个细节都能完美执行,而生物人只需要在关键的艺术表

现和突发情况处理时介入。在大多数情况下,由数字人和机器人主导音乐创作和演奏的自主模式;遇到异常问题时,系统会切换到生物人参与的平行模式;如果问题紧急或难以解决,则进入以生物人为主的应急模式,使系统运行回归正常。平行执行确保虚实系统的实时互动和高效协同,使作曲者能够专注于艺术创作,而系统负责具体的执行和优化工作,这不仅有效提升了音乐创作和演奏的质量与效率,还能够根据实时反馈不断优化和调整创作和演奏策略。通过上述机制,平行音乐系统实现了虚实之间的高效互动和协同工作,推动了音乐创作和演奏过程的智能化和高效化。

#### 4.2 多模态信息驱动的音乐治疗

全球化进程的加速使当代社会对精神需求和情绪价值的重视日益增加,音乐作为情绪价值的重要驱动力之一,正成为疗愈经济中的核心元素。而音乐疗愈赛道因其独特的作用和潜力,逐渐成为市场关注的焦点。在这一过程中,大语言模型等人工智能技术支持下的平行音乐系统,为音乐治疗的个性化和动态化提供支持。

音乐治疗作为一种非药物治疗手段,利用声音和音乐的特性,通过定制化的疗愈音乐,为有需要的个体提供针对身心需求的治疗,激发人体和心灵的积极反应,从而达到身心健康的目的。音乐治疗的过程中,涉及音乐的创作与播放和对个体的情绪状态和心理需求的深入理解。其中,大语言模型凭借其强大的自然语言处理能力,通过对用户反馈的实时分析,理解用户的情绪和需求,生成个性化的音乐疗愈方案,提升音乐治疗的有效性,增加用户的参与感和满意度。过程中,模型不断学习和优化,进而提供更加精准和高效的治疗方案。与此同时,结合图像识别和自然语言处理技术,通过分析用户的面部表情、肢体语言等视觉信号,进一步了解用户的情绪状态,并且实时监测和评估用户在接受音乐治疗过程中的反应,据此调整音乐内容和节奏,实现更加动态和更具互动性的治疗体验,使音乐治疗具备高科学性和高效性。

在当代社会中,精神需求和情绪价值的提升为音乐疗愈提供了广阔的发展空间。大模型为个性化和动态化的音乐治疗提供了有力支持。通过声音激发人体和心灵的积极反应,音乐治疗在提升人们身心健康方面展现出巨大潜力。随着AI技术的进一步发展和应用,未来音乐疗愈将有望在全球疗愈经

济中占据更加重要的位置,为更多有需要的个体提供有效的治疗方案。

## 5 结束语

本文探讨了基于LLMs等AI技术和3类平行人类的音乐创作演绎框架——平行音乐系统。该系统利用人工系统、计算实验与平行执行的集成方法,模拟与预测音乐创演的多种可能情景,实时同步实际创演与虚拟模拟创演数据,实现虚拟交互闭环,辅助音乐艺术家提升音乐创作与表演的效率与质量,并架构了一个宽广的创意平台,使艺术家能够深入挖掘音乐表达的新境界。

未来平行音乐系统的发展将会更加注重智能化与自适应性的提升。随着AI技术的不断进步,智能互动且个性化的音乐创作与表演新环境正逐渐成形。平行音乐系统将进一步整合多模态输入,如触觉、视觉与听觉的全方位感知,增强音乐的表现力,提供更为丰富的用户体验。在教育与疗愈领域,平行音乐系统的高度定制化与强互动性,有望为音乐教育提供更具吸引力的学习工具,同时为音乐疗法带来更精确的治疗方案。平行音乐系统将不断发展和完善,持续推动音乐产业智能化、个性化服务发展,带来更新的艺术表达和创作体验。

#### 参考文献:

- [1] CROSS I. Music, mind and evolution[J]. *Psychology of Music*, 2001, 29: 95-102.
- [2] JUSLIN P N, VÄSTFJÄLL D. Emotional responses to music: the need to consider underlying mechanisms[J]. *The Behavioral and Brain Sciences*, 2008, 31(5): 559-575.
- [3] MIRANDA E R, WANDERLEY M. New digital musical instruments: control and interaction beyond the keyboard (computer music and digital audio series)[M]. Wisconsin: A-R Editions, Inc., 2006.
- [4] 王飞跃. 平行艺术: 从艺术的智能化到智能的艺术化[R]. 2017. WANG F Y. Parallel art: from intelligent art to artistic intelligence[R]. 2017.
- [5] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统: 关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, 1(4): 25-35. WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(4): 25-35.
- [6] KOEPKE P. The composing process[J]. *American Music Teacher*, 1958, 7(5): 6-20.
- [7] Erickson R. Composing music[J]. *Perspectives of New Music*, 1998, 26(2): 86-95.
- [8] HULSE B. Becoming-composer[J]. *Perspectives of New Music*, 2015, 53(1): 219-237.

- [9] ALPERSON P. The instrumentality of music[J]. *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 2008, 66(1): 37-51.
- [10] MACRITCHIE J, ZICARI M, BLOM D. Identifying challenges and opportunities for student composer and performer peer learning through newly-composed classical piano scores[J]. *British Journal of Music Education*, 2018, 35(2): 153-175.
- [11] FRISCH R. *Mastering the orchestra audition: a musician's guide*[M]. Minneapolis: Kairos Publications, 2017.
- [12] TIMME E. Intonation facts[J]. *Music Educators Journal*, 1943, 29(3): 19-20.
- [13] HAFNER K. Piano tuners have built a bridge to 18th century[N]. *New York Times*, 2000-02-17.
- [14] LIM K A, RAPHAEL C. InTune: a system to support an instrumentalist's visualization of intonation[J]. *Computer Music Journal*, 2010, 34(3): 45-55.
- [15] BOULEZ P. Technology and the composer[J]. *Leonardo*, 1978, 11: 59-62.
- [16] SMITH N T, PETERS P, MOLINA K. *Classical music futures: practices of innovation*[M]. Cambridge: Open Book Publishers, 2024.
- [17] HILLER L AND ISAACSON L. Musical composition with a high-speed digital computer[J]. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1958, 6(3): 154-160.
- [18] YANCHENKO A K, MUKHERJEE S. Classical music composition using state space models[EB]. arXiv preprint, 2017, arXiv:1708.03822.
- [19] EIGENFELDT A. Corpus-based recombinant composition using a genetic algorithm[J]. *Soft Computing*, 2012, 16(12): 2049-2056.
- [20] BICKERMAN G, BOSLEY S, SWIRE P, et al. Learning to create jazz melodies using deep belief nets[C]//*Proceedings of the International Conference on Computational Creativity*. [S.l.:s.n.]. 2010: 228-237.
- [21] GRACHTEN M, CHACÓN C E C. Strategies for conceptual change in convolutional neural networks[EB]. arXiv preprint, 2017, arXiv: 1711.01634.
- [22] BRETAN M, WEINBERG G, HECK L. A unit selection methodology for music generation using deep neural networks[EB]. arXiv preprint, 2016, arXiv: 1612.03789.
- [23] HADJERES G, PACHET F, NIELSEN F. DeepBach: a steerable model for bach chorales generation[EB]. arXiv preprint, 2016, arXiv: 1612.01010.
- [24] Widmer G. The musical expression project: A challenge for machine learning and knowledge discovery[C]// *Proceedings of 2001 European Conference on Machine Learning (ECML)*. Berlin: Springer, 2001: 603-614.
- [25] THÖRN O, FÖGEL P, KNUDSEN P, et al. Anticipation in collaborative music performance using fuzzy systems: a case study[EB]. arXiv preprint, 2006, arXiv: 1906.02155.
- [26] DHARIWAL P, JUN H, PAYNE C, et al. Jukebox: a generative model for music[EB]. arXiv preprint, 2020, arXiv: 2005.00341.
- [27] CAILLON A, ESLING P. RAVE: a variational autoencoder for fast and high-quality neural audio synthesis[EB]. arXiv preprint, 2021, arXiv: 2111.05011.
- [28] WU S L, DONAHUE C, WATANABE S, et al. Music ControlNet: multiple time-varying controls for music generation[J]. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2024, 32: 2692-2703.
- [29] YUAN R B, LIN H F, WANG Y, et al. ChatMusician: understanding and generating music intrinsically with LLM[EB]. arXiv preprint, 2024, arXiv: 2402.16153.
- [30] AGOSTINELLI A, DENK T I, BORSOS Z, et al. MusicLM: generating music from text[EB]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2301.11325.
- [31] XU T Z, LI J J, CHEN X S, et al. Mozart's touch: a lightweight multi-modal music generation framework based on pre-trained large models[EB]. arXiv preprint, 2024, arXiv: 2405.02801.
- [32] WANG F Y, ZHANG J J, ZHENG X H, et al. Where does AlphaGo go: from church-turing thesis to AlphaGo thesis and beyond[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, 3(2): 113-120.
- [33] WANG F Y, MIAO Q H, LI X, et al. What does ChatGPT say: the DAO from algorithmic intelligence to linguistic intelligence[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(3): 575-579.
- [34] WANG F Y, MIAO Q H, LI L X, et al. When does sora show: the beginning of TAO to imaginative intelligence and scenarios engineering[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2024, 11(4): 809-815.
- [35] LU Y, GUO C, DAI X Y, et al. Data-efficient image captioning of fine art paintings via virtual-real semantic alignment training[J]. *Neurocomputing*, 2022, 490: 163-180.
- [36] 鲁越, 郭超, 林懿伦, 等. 绘画艺术图像的计算美学: 研究前沿与展望[J]. *自动化学报*, 2020, 46(11): 2239-2259.
- LU Y, GUO C, LIN Y L, et al. Computational aesthetics of fine art paintings: the state of the art and outlook[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(11): 2239-2259.
- [37] 林飞, 王飞跃, 田永林, 等. 平行药物系统: 基于大语言模型和三类人的框架与方法[J]. *智能科学与技术学报*, 2024, 6(1): 88-99.
- LIN F, WANG F Y, TIAN Y L, et al. Parallel drug systems: framework and methods based on large language models and three types of humans[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2024, 6(1): 88-99.
- [38] WANG F Y, LIN Y L, IOANNOU P A, et al. Transportation 5.0: the DAO to safe, secure, and sustainable intelligent transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(10): 10262-10278.
- [39] 黄峻, 田永林, 戴星原, 等. 基于深度学习的自动驾驶多模态轨迹预测方法: 现状及展望[J]. *智能科学与技术学报*, 2023, 5(2): 180-199.
- HUANG J, TIAN Y L, DAI X Y, et al. Deep learning-based multi-modal trajectory prediction methods for autonomous driving: state of the art and perspectives[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2023, 5(2): 180-199.
- [40] LU Y, GUO C, DAI X Y, et al. ArtCap: a dataset for image captioning of fine art paintings[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2024, 11(1): 576-587.
- [41] LU Y, GUO C, DOU Y, et al. Could ChatGPT imagine: content control for artistic painting generation via large language models[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2023, 109(2): 39.
- [42] LU Y, GUO C, DAI X Y, et al. Generating emotion descriptions for fine art paintings via multiple painting representations[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2023, 38(3): 31-40.
- [43] GE L, LV B, LI N, et al. A Hypertension parallel healthcare system based on the ACP approach[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2022, 6: 724-728.
- [44] YU Y, YAO S Y, WANG K X, et al. Pursuing equilibrium of medical resources via data empowerment in parallel healthcare system[C]// *Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Honolulu: IEEE Press, 2023: 3186-3191.
- [45] 王拥军, 王飞跃, 王戈, 等. 平行医院: 从医院信息管理系统到智慧医院操作系统[J]. *自动化学报*, 2021, 47(11): 2585-2599.
- WANG Y J, WANG F Y, WANG G, et al. Parallel hospitals: from hospital information system (HIS) to hospital smart operating system (HSOS)[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(11): 2585-2599.
- [46] 倪清桦, 郭超, 王飞跃. 平行戏剧: 新时代戏剧的人机协同创作与智

能管理[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(4): 436-445.

NI Q H, GUO C, WANG F Y. Parallel theaters: human-machine collaborative creation and intelligent management for theatrical art[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(4): 436-445.

- [47] 皮佩定, 倪清桦, 杨静, 等. 平行夏尔希里: 生态资源智能管护及其可持续发展新途径[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(3): 283-292.

PI P D, NI Q H, YANG J, et al. Parallel Sharhili: a new approach to sustainable development and intelligent management of ecological resources[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(3): 283-292.

- [48] 郭超, 鲁越, 林懿伦, 等. 平行艺术: 人机协作的艺术创作[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(4): 335-341.

GUO C, LU Y, LIN Y L, et al. Parallel art: artistic creation under human-machine collaboration[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(4): 335-341.

- [49] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001-2031.

YANG L Y, CHEN S Y, WANG X, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001-2031.

- [50] 李士果, 卢建云. Hadoop 3.0 大数据平台性能[J]. 电子技术与软件工程, 2019(5): 158-160.

LI S G, LU J Y. Hadoop 3.0 big data platform performance[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(5): 158-160.

#### [作者简介]



倪清桦 (1999-), 女, 澳门科技大学博士生。主要研究方向为平行智能、数字孪生、智能系统等。



鲁越 (1994-), 男, 博士, 山东大学控制科学与工程学院博士后, 主要研究方向为机器学习、小样本学习、机器人系统。



林飞 (1994-), 男, 澳门科技大学博士生, 主要研究方向为平行系统、大语言模型、多模态感知、生成式人工智能。



黄峻 (1998-), 男, 澳门科技大学博士生, 主要研究方向为平行智能、自动驾驶轨迹预测规划、提示工程。



王艺瑾 (1996-), 女, 美国加州大学洛杉矶分校音乐学院音乐艺术博士生, 主要研究方向为古典音乐、单簧管演奏等。



林伟华 (1961-), 男, 博士, 美国亚利桑那大学教授, 资深音乐爱好者, 主要研究方向为智能交通系统系统优化、物流和交通网络分析。



王飞跃 (1961-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 兼任中国国家博物馆科学与艺术研究所所长, 主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能、知识自动化。