

人工智能技术在高校音乐教学领域的应用研究

张诗梅¹ 范家琛² 高庆一³

1.西南大学音乐学院, 重庆 400715;

2.清华大学经济管理学院, 北京 100084;

3.法国高等对外贸易学院 全球华语区, 上海 200120

DOI:10.12238/er.v8i6.6178

[摘要] 如何有效应用人工智能技术提升音乐教学活动的效率和质量, 是音乐教学界当前面临的重要问题。该研究基于音乐教学的现状与痛点, 结合人工智能技术特征, 分析了人工智能技术在教学资源匹配、教学方案生成、教学成果评估、教学器材改进、教学场景拓展等五个场景中的应用逻辑和模式, 辩证地探讨了人工智能技术应用面临的三项挑战, 构建了人工智能在音乐教学中应用的“12329”方案, 并提出了六项建议。

[关键词] 人工智能; 音乐教学; 协同

中图分类号: G424.1 **文献标识码:** A

Research on the Application of Artificial Intelligence Technology in the Field of Music Teaching in Colleges and Universities

ZHANG Shimei¹, FAN Jiachen², GAO Qingyi³

1. School of Music, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Economics and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Ecole Sup é rieur e des Affaires Etrang è res, Global Chinese Area, Shanghai 200120, China

Abstract: How to effectively apply artificial intelligence technology to improve the efficiency and quality of music teaching activities is an important issue currently facing the music teaching community. Based on the status quo and pain points of music teaching, this paper combines the characteristics of AI technology, analyses the logic and mode of application of AI technology in five scenarios, including matching of teaching resources, generation of teaching programs, evaluation of teaching results, improvement of teaching equipment, and expansion of teaching scenarios, and dialectically discusses the three challenges faced by the application of AI technology to construct a ‘12329’ programme, and put forward six suggestions.

Keywords: artificial intelligence, music teaching, synergy

1 引言

习近平总书记强调“人工智能是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量, 加快发展新一代人工智能是事关我国能否抓住新一轮科技革命和产业变革机遇的战略问题”。人工智能是让机器做本需要人的智能才能做到的事情的一门科学^[1], 以求通过机器、系统或网络人工实现各种智能行为^[2]。当前, 人工智能技术的应用广度和深度都在快速提升^[3], 到2030年人工智能将贡献15.7万亿美元的全球经济, 而中美两国将占据其中的70%。音乐领域是人工智能应用的重要板块之一, 人工智能技术能通过大数据分析人类音乐智能, 构架其自身神经网络及算法生成, 并应用于音乐感知、音乐研究、音乐创作、音乐教学^[4]。音乐教学是影响未来音乐发展的关键性工作, 深刻认识加快发展人工智能在音乐教学领域的应用, 已成为一项亟待解决的重要问题。在此背景下, 本

文研究分析了人工智能技术在音乐教学领域应用的场景与潜在挑战, 并构建了人工智能在音乐教学中应用的“12329”方案, 以求促进音乐教学质量和效率的有效提升。

2 人工智能在音乐教学中的应用场景

2.1 教学资源的快速匹配

教学资源为教学活动提供了最重要的要素支撑, 教学资源的高效识别与有效转化是提升音乐教学效率和质量的重要保障。随着人类社会的快速发展, 音乐领域的资料快速积累, 目前世界范围内已经留存有数以万计的音乐资源, 同时每天都有大量的音乐作品被创作出来。这意味着音乐教学工作者在选取教学资料之时, 将面临海量的原始素材, 如何有效识别、甄别、辨别这些资源, 快速筛选出与自身教学需求及教学目标相匹配的素材, 组合形成合适的教学资源, 是当前音乐教学工作者面临的重要问题。在传统情景下, 音乐教

学工作者往往只能在自己知识储备范围内的素材中寻找教学资源，或者使用通用性的互联网搜索引擎，基于部分关键词搜索可用的素材。但是相关活动的效率和精准性往往受到极大限制，导致“想要的素材找不到，找到的素材不能用”的问题。此外，一些音乐教学者会在生活情景中偶然接触到一些可用于教学的音乐素材片段，但自身的知识储备却无法对其进行快速识别，错失可用的教学资源。上述问题共同形成音乐教学活动中教学资源识别与整合方面的综合性问题。

人工智能技术能够基于预设的智能算法实现一系列智能、高效、快速的音乐检索、乐谱识别、音频识别等教学资源识别与匹配工作：

一是音乐的智能检索。人工智能技术能够基于在短时间内获得的，包括文本、音频片段、特征描述、实例等有限的音乐信息，在现有的云端/网络数据库中进行快速筛选、匹配、呈现，以文本、乐谱、音频或音序等形式向使用者提供目标音乐的智能检索结果，实现外部音乐信息向有效教学资源的实时转化。例如网易云音乐、酷狗音乐、QQ音乐等常见的音乐播放软件都支持“听歌识曲”功能，这一功能就是人工智能技术在音乐智能检索领域的应用示例之一。除了对目标音乐信息的快速检索外，人工智能技术还能基于机器学习技术和深度学习技术，结合使用者先前的使用记录以及此次检索的音乐素材特征，为使用者提供近似素材的推荐。例如当我们检索贝多芬的一首曲子时，人工智能检索系统不仅会为我们提供该首曲子的相关资料，还会为我们推荐贝多芬的其他音乐资料、与该首曲子旋律相近的其他曲目、与该曲子存在关联的其他曲目等推荐信息。这种高精度的智能检索和关联推荐功能可有效提升音乐教学活动中对教学资源的检索效率。

二是音频转化。除快速识别检索音乐资料外，人工智能技术还能结合使用者的需求，在短时间内将音频文件转化为文本文件、视频文件、图片文件等不同形式的音乐教学素材。例如将圆舞曲匹配上风格相符的无声视频或者是演奏该曲目的演奏画面资料，形成教学视频。这种基于人工智能技术的音频转化功能，能够以更加多元化的形态展现原本单一的教学资料，提升教学的趣味性和吸引力。

三是乐谱的智能识别与转化。除音频资料外，人工智能技术还可以对更为复杂的乐谱进行精确识别和智能转化。结合扫描设备，人工智能技术可以对纸质乐的乐谱进行精准识别、修正、储存，形成数字乐谱资料体系，提高教学活动中纸质乐谱转存为数字乐谱的效率和精准度^[5]。在此基础上，人工智能技术讲数字乐谱智能转化为音频，实现音频和乐谱之间的双向转化，提升教学资源的应用效率。

目前，人工智能技术在英语教学资源检索、匹配、转化

等领域的应用正在不断深化，随着机器学习和深度学习等技术的不断演化，其检索速度、匹配精度、转化效率都在不断提升，为音乐教学效率的提升进一步夯实了资源端的基础。

2.2 教学方案的专属定制

“因材施教”是中国自古以来的教育理念，但在教育实践中往往难以得到有效实现，在音乐教学中这一问题尤为凸显。一方面，不同学生掌握的音乐知识、擅长的乐器、拟担任的演奏角色往往都存在很大差异，这使得不同学生的学习需求差异类别多样且复杂。一般情况下，教学老师很难对每个学生的差异化特征与需求进行有效的统计与分析。另一方面，音乐教学涉及理论学习和乐器实操等多个环节，教学的整体复杂度较一般学科更高。一般情况下，教学老师也无法制定实施在各个教学环节能够有效针对不同学生需求的系统化教学方案。上述问题往往在教学实践中对音乐课程的整体教学效率造成无可回避的限制。而人工智能技术的发展和应用则为实现音乐教学中的“因材施教”提供了强有力的支撑。具体而言，人工智能技术的应用能够实现学生学习能力与需求的全面分析、系统教学方案设计、教学方案的迭代优化三项工作：

一是学生学习能力与需求的全面分析。人工智能技术能够基于预设的程序编码以及学生自主输入的特征信息与需求信息，对每一个学生的优势和教学需求进行智能分析，形成专属化的教学分析档案。该档案既可帮助学生进一步了解自身的优劣势、真实需求、适合的发展方向等信息，也能为教学老师制定和修改教学方案提供数据支撑。

二是系统教学方案设计。应用人工智能技术的智能教学方案生成系统，能够基于课程教学宗旨、教学人员能力特征、教学资源状态、学生的专属化教学分析档案，智能生成系统化的教学方案。此类方案覆盖课程教学的全生命周期，依据各类信息系统规划每一个教学节点、每一次课程、每一阶段的细化教学内容、方法、要点，以便在最小程度增加教学难度的情况下，最大程度满足各学生的差异化学习需求，实现“因材施教”的教学目标。

三是教学方案的迭代优化。最佳的智能教学方案并不是一蹴而就的，人工智能系统初次形成的教学方案仅是在初始设置条件下的最优教学方案。随着教学进度的不断深入，学生的能力特征与需求、教师的教学能力、教学资源都会发生变化，而人工智能系统则可依据上述信息，阶段性地对原有的教学方案进行迭代优化。即形成动态的最优教学方案，最大程度提升教学效率。

2.3 教学成果的智能评估

公正化、专业化、启发性的教学评估，是有效评定学生阶段性学习成果、激发学生学习积极性、改进课堂教学质量

的重要助推剂。目前，音乐教学过程中对学生学习状况的评估主要以评估者的经验主义性的主观判断为主。例如在对学生歌唱声音质量的评价过程中，评价者会使用“明亮、暗淡、柔和”等主管形容词来对被评估者的“音色、音质、音强”等属性进行判断，并将这些主观感受转化为定量性的具体分数^[6]。这种评估模式可能会导致一系列的潜在问题。首先，音乐是一个开放性很强的领域，差异化的风格拥有各自的艺术价值，而评估者的个人偏好可能会影响评估的公正性。其次，在学生多老师少的现实背景下，评估者往往需要先后对大量学生进行评估，而其精力和主观判断的精准性也会随着工作时间的延长而下降，不利于保证教学评估的质量。最后，音乐领域中高水平的评估者较为稀缺，这也使得许多音乐教学活动中的成绩评估效率低下。

此外，音乐教学过程中对教师的教学质量的评估主要采用“学生期末评价+督导员视察评估+学生成绩评估”的评估模式，这一模式也存在一些问题。一是大部分学生自身尚不具备专业的教学评估能力，其评估结果比较容易受非教学因素的影响。二是督导员的评估虽然专业却是阶段性的，无法对教学过程进行全生命周期的跟踪和实时评估，容易引发教学人员的机会主义行为。三是现有的教学评估活动并不能直接为教学人员提供优化方案，容易出现发现问题但不知道如何优化的问题。

人工智能技术的应用能有效提升音乐教学过程中对学生学习状况以及教学人员教学质量评估的质量与效率。一方面，人工智能系统可以基于机器学习技术和深度学习技术，对各类音乐行为的评判标准进行多元化的学习和模拟，构建发展专业领域的音乐智能评估程序用于评估学生的学习状况。例如，目前已有研究证明高质量的歌唱声音与低质量的歌唱声音在频谱图形上存在频率、能量等指标的明显差异^[6]。编程人员可以让人工智能系统对这些评判标准进行学习和演练，进而用于对学生歌唱活动的智能评估并给出相应的发展建议。这种人工智能评估系统并不存在主观偏好，其评估效率也不会受到工作时间的影响，更能够通过终端设备实现多区域使用，进而弥补当前音乐教学过程中对学生学习状况评估所存在的三项缺陷。另一方面，人工智能系统也能记录每一次教学活动中教学人员的活动并基于事先生成的智能评估体系对其进行实时评估，及时指出问题、总结优秀经验、提供优化方案，进而实现教学活动的全生命周期实时迭代。

2.4 教学器材的迭代创新

乐器演奏是音乐教学的重要组成部分，但传统的乐器演奏需要演奏者充分了解乐器的结构并拥有扎实的基本功。这一特征决定了乐器演奏教学初期的教学效率低下，进而影响整体教学进程。长期以来，乐器设计与制造行业的发展与音

乐教学活动之间都存在一种双向的良性互动。随着人工智能技术发展与应用的不断深化，新型的智能乐器如“The ONE 智能钢琴”“FIND 智能钢琴”“GEEK 智能吉他”等也开始出现，并于2015年后快速发展^[7]。这些智能乐器将人工智能技术与传统乐器设计相结合，能够在预设的需求特征的基础上，在使用者的演奏过程中进一步学习演奏者习惯，并对乐器的相关参数进行调整，以便提升演奏效率。部分初级的智能乐器则可以通过提示信息以优化演奏活动。例如，智能钢琴可以根据演奏者的练习情况制定专门的学习计划，在演奏时会有显示屏对演奏者进行提示，辅助演奏者顺利完成音乐演奏。智能乐器改变了传统乐器的演奏方式、教学模式与年龄限制，不仅可以用于音乐表演，也可以用于音乐教学，以降低教学难度，提升教学效率。

智能乐器虽然拥有广阔的发展前景与市场，但目前仍处于发展初期，还并未达到普及阶段。其大规模研发、生产、应用需要我国教育工作者与技术研发者进一步进行研究。

2.5 教学场景的空间拓展

音乐教学过程中需要用到乐器等一系列教学器材，且对教学人员的现场示范与指正要求较高，从空间维度限制了音乐教学的时间长度和教学效率。人工智能技术的应用可通过智能音乐教学软件、智能音乐机器人、智能虚拟教学场景等三个途径助力实现音乐教学场景的空间拓展。

一是智能音乐教学软件对音乐教学场景的空间拓展。随着人工智能技术的不断进步，大量智能化的音乐教学、创作、欣赏软件涌入市场。教学人员可以通过钉钉、伯索云、腾讯课堂等软件在线上实现双向“一对一”、“一对多”视频上课，进而实现相应教学内容和教学目标^[8]。例如，钢琴教师在授课时可以亲自示范和点评，结合软件功能和主观经验及时纠正学生的手型及指法、坐姿等问题。而学生参与远距离课程时也可以及时接收到关于自身错误的智能提示和修正方案，参照相关建议立即进行改正。相关软件配备的回放功能与课后作业的布置、“人工+智能”双引擎及收取作业等功能，也能在实现教学空间拓展的背景下进一步优化教学体验和教学效率。

二是智能音乐机器人对音乐教学场景的空间拓展。虽然智能教学软件的出现极大的延伸了音乐的教学场景空间，但仍需要依赖于教师，无法实现随时随地的教学。而智能音乐机器人的出现则在一定程度上解决了这一问题。智能音乐机器人可以基于内设的程序实现音乐的自动演奏与教学，学生可依据自身的学习需求对智能音乐机器人的教学内容、方式、进度等进行调整，形成定制化的教学方案。目前市场上已经存在的智能音乐机器人包括钢琴机器人、小提琴机器人、长笛机器人、风笛机器人、马林巴机器人等。智能音乐机器人

的出现能在一些教学场景中部分替代音乐老师的作用，有助于进一步实现教学场景的自由化。

三是智能虚拟教学场景。人工智能与元宇宙等技术的交互，进一步为无教师、无设备、无界限的音乐教学提供了可能。“人工智能+元宇宙”能够在虚拟空间内为学生提供虚拟的教学场景与演练场景，学生无需自备乐器，只需戴上VR设备就可以在元宇宙中基于人工智能技术构建的虚拟人老师进行音乐学习，最大程度突破空间与乐器等现实物质对于音乐教学的限制。此外，老师也可以基于“人工智能+元宇宙”进行教学训练，学生与老师的双向训练，共同提升自身的能力与现实空间中的教学效率。

3 人工智能在音乐教学中面临的挑战

虽然人工智能技术已经被应用于音乐教学领域，且其应用场景、模式、载体都在快速增加，但人工智能技术在音乐教学领域的应用仍然面临一定的挑战，具体包括人工智能的技术成熟度问题、数据隐私与版权问题、潜在的教育不公平问题等三项挑战。

一是人工智能的技术成熟度仍然不足。虽然人工智能技术已经取得了长足发展，且已经在诸多领域进行了应用实践，但其发展与应用仍然未达到成熟阶段。目前投入应用的人工智能技术主要为弱人工智能技术，弱人工智能技术条件下人类只能制造出具有部分智能特征的机器，但这些机器并不真正拥有智能和自主意识，不能真正实现智能推理和有效解决问题的智能机器。而音乐则是一个充满了自主创造和自主评价的领域，弱人工智能技术无法单凭自身独立解决音乐教学领域的相关问题。在强人工智能技术出现并成功应用之前，人工智能技术在音乐教学领域中的应用将更多地表现为教师与基于弱人工智能技术开发的智能教学系统中的协同，共同为学生提供优质的教学服务。

二是存在数据隐私和版权带来的限制。人工智能技术在音乐教学领域的应用必须以海量的数据和要素作为前提。一方面，要使用人工智能技术制定专属化的教学方案和优化教学流程，相关人员就必须对学生的特征信息、教师的特征信息、教学过程中的数据信息进行广泛的采集。并基于机器学习技术和深度学习技术让人工智能系统对相关资料进行自主学习和分析，并最终形成高专业度的需求评估、问题分析、

优化方案制定等能力。但是，这些数据的收集和应用必须以数据来源方的许可为前提。在遵循自主自愿的原则时，出于隐私保护等动机，一部分学生或教师可能并不愿意提供相关数据资料。该情况将极大地限制人工智能技术应用的数据基础，进而降低后者的分析精度和应用效率。另一方面，人工智能技术在音乐教学资源整合领域的应用还涉及大量音乐作品的版权问题。以智能音乐检索应用为例，如果要实现快速向检索者提供被检索音乐的细节信息和完整音频，那么这个智能检索系统的运营商就得购买该音乐的版权。而运营商的版权成本也将随着其音乐素材库的扩大而快速增长，并最终促使其在扩大规模和控制成本之间做出抉择。总体而言，数据隐私问题和版权问题会显著滞缓人工智能技术在音乐教学领域应用规模的扩大和应用程度的深化。

三是各地区各单位在人工智能技术应用能力上的差异可能导致的教育不公平问题。作为高精尖技术的代表，人工智能技术的发展与应用往往也伴随着一定规模的研发和应用成本。并非所有地区的所有单位都有能力和有意愿承担相应的成本以推进人工智能技术在音乐教学领域的应用，这一特征会导致未来不同单位在人工智能化的音乐教学上存在显著的差异。虽然投入差异导致的教学成果差异是一种正常的现象，但鉴于人工智能技术可能对音乐教学带来的革命性影响，政府机构、高校单位、音乐教师等主体仍需提前关注相关问题，避免未来出现人工智能技术应用导致的音乐教育绝对不公平问题。

4 人工智能在音乐教学中应用的“12329”方案

人工智能技术可以通过多个途径影响音乐教师和学生，进而提升音乐教学的效率。这种影响不容忽视，但并非一蹴而就的，而是一种长期的渐进的协同衍化过程。为加速实现人工智能技术在音乐教学应用效率和质量的提升，本文特在此提出人工智能在音乐教学中应用的“12329”方案（详见图1）。

其中“1”是指一内核，即以多元数据为内核；“2”是指二支撑，即政策支撑和技术支持；“3”是指三协同，即音乐教师与学生之间的协同、音乐教师与人工智能系统之间的协同、学生与人工智能系统之间的协同；“29”是指二十九项组成要素。

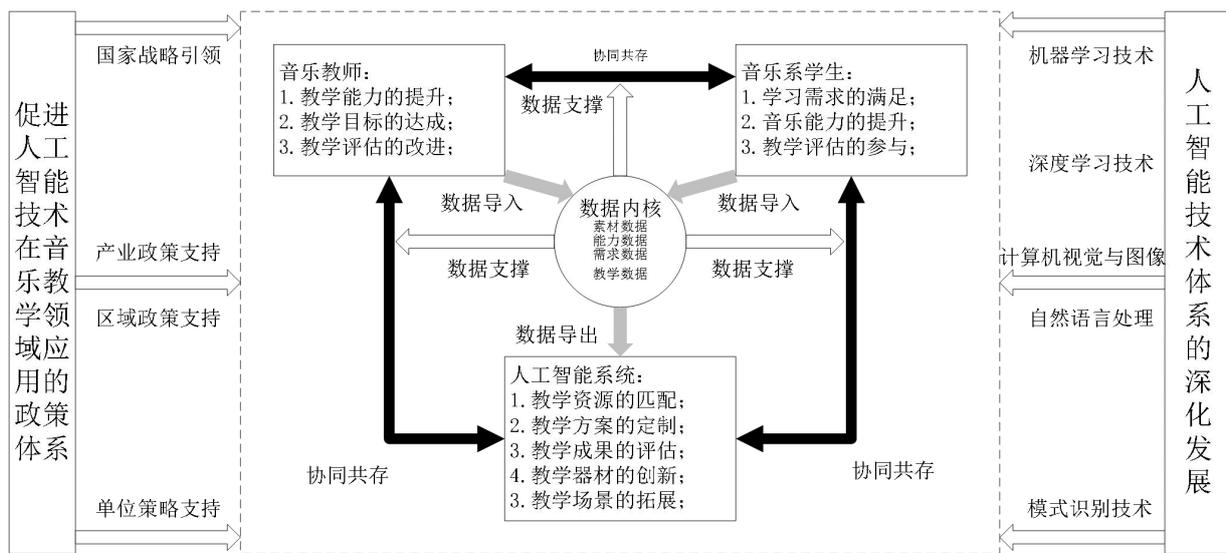


图1 人工智能在音乐教学中应用的“12329”方案

具体来说，人工智能技术在音乐教学领域的应用必须以包括教学素材数据、学生能力与需求数据、教师能力数据、教学数据等多种类别的广泛聚合、系统分析、有效转化作为内核驱动，为音乐教师、学生、人工智能系统之间的高效协作提供数据基础。同时，人工智能作为一种前沿科技，其在音乐教学领域的应用离不开包括国家战略、区域政策、行业政策、单位策略的方向指引，更需要包括机器学习、深度学习、计算机视觉与图像，自然语言处理、模式识别等人工智能技术的支撑。在此基础上，音乐教师、学生、人工智能技术三者之间需要进行双向的协同合作，共同实现教学方案、效率、成果的优化。在协同框架下，音乐教师需要向人工智能系统提供包含自身能力特征数据、课程教学目标与要求、全生命周期教学信息等在内的系列数据，为人工智能系统的智能分析提供资源支撑。人工智能系统则需向教师提供系统教学方案并按期进行迭代优化，配合教师的教学需求快速检索、整合、转化、提供教学素材，基于教学过程的全生命周期记录阶段性地对教师的教学能力等因素进行智能评估。学生方面需要在保障个人隐私的基础上向人工智能系统提供自身的能力、特征、需求、学习信息，而后者则可在空间拓展和音乐器具支持上为学生的自学活动提供技术支持，并对学生的学习行为、效率、成果进行客观、专业、动态的评估。最后，即便使用了人工智能系统，音乐教师也需要和学生进行高频度的有效协同。音乐教师需要尽自己所能为学生提供现场教学指导、学习资源支持、具备专业能力的成绩评估，学生则需要向教师提供自身的学习需求和学学习反馈，并根据客观事实，对教师的教学活动进行评估。

5 结语

在人工智能技术快速发展并在教育领域深化应用的背

景下，本文探讨了教学资源的快速匹配、教学方案的专属定制、教学成果的智能评估、教学器材的迭代创新、教学场景的空间拓展等五个人工智能技术在音乐教学领域的应用场景；分析了人工智能的技术成熟度不足、数据隐私和版权限制、教育不公平等三点人工智能技术在音乐教学领域应用存在的挑战；提出了人工智能在音乐教学中应用的“12329”方案。为进一步促进人工智能技术在音乐教学领域应用的效率和质量，本文特此提出以下六点建议：

一是提升对人工智能技术影响的认知与重视程度。以国家战略为引领，结合产业发展态势和区域发展规划，以教学单位为主体，因势利导，因地制宜，针对教学难点痛点，建立差异化、定制化、高效化的人工智能技术音乐教学应用策略；二是建立和完善音乐教学数据的治理机制。在充分保护知识产权和数据隐私的基础上，预先识别、收集、整理、储存包含音乐教学资源、音乐教学参与人员能力数据、教学过程数据等在内的综合性教学数据，提升数据资源的转化应用效率，为人工智能技术在音乐教学领域的应用夯实数据基础；三是推动针对性人工智能技术的研发应用。基于音乐教学活动的切实需求，以用户参与的模式开发人工智能技术在音乐教学资源检索、音乐教学方案生成、音乐教学评估等具体领域的应用算法，提升技术供需两端的匹配精度与效率。四是探索实施全生命周期式的技术应用模式。立足音乐教学活动全生命周期各个阶段的具体特征，制定实施阶段性的人工智能动态应用模式，实现人工智能技术在教学需求分析、教学资源匹配、教学方案定制、教学过程优化、教学评估等活动中应用的有效整合；五是强化教师、学生与人工智能系统之间的三方协同。要正确认识各类主体在人工智能化的音乐教学活动中的定位、作用、需求，以教师与学生间的有效协同

为基础，以人工智能系统与人之间的协同为拓展，结合不同教学场景的特征，实施多层次、全方位、复合化的多元协同模式；六是兼顾对潜在挑战的有效应对。要以辩证地看待人工智能对音乐教学的影响，技术赋能与风险防治并重，实现潜在风险的提前预测、及时感知、有效管控，进一步提升人工智能技术在音乐教学领域应用的整体价值。

[参考文献]

- [1] Minsky M. Steps Toward Artificial Intelligence[J] Proceedings of the IRE, 1961(1): 8-30.
- [2] Li D, Du Y. Artificial intelligence with uncertainty[M]. CRC press, 2017.
- [3] 郭凯明. 人工智能发展、产业结构转型升级与劳动收入份额变动[J] 管理世界, 2019(7): 60-77,202-203.
- [4] 李伟. 音乐人工智能在音乐教育领域中的应用及研究[J] 星海音乐学院学报, 2019(3): 145-150.
- [5] 陈根方. 面向音乐艺术院校研究生的“音乐与人工智能”科普课程[J] 计算机教育, 2019(6): 109-112.

[6] 苗雨. 基于人工智能技术的歌唱发音质量客观评价研究综述[J] 音乐探索, 2012(3): 119-126.

[7] 韩梅, 李茜蒙, 姚德鹏, 等. 人工智能与音乐教育发展探究[J] 亚太教育, 2022(2): 10-12.

[8] 刘钰滢. 教育面向未来——基于音乐人工智能的钢琴教育探究[J] 艺术评鉴, 2022(7): 134-137.

作者简介:

张诗梅(1981.02-), 女, 汉族, 山东郓城人, 硕士研究生, 西南大学音乐学院副教授, 研究方向为声乐表演及声乐教育。

范家琛(1997.03-), 男, 汉族, 浙江台州人, 博士研究生, 清华大学经济管理学院博士后, 研究方向: 国际贸易、商业模式、北斗产业化应用。

高庆一(1979.09-), 男, 汉族, 北京人, 博士研究生, 法国高等对外贸易学院教授, 研究方向: 人工智能、数据挖掘、复杂系统可靠性工程、商业模式。