

虚拟仿真与声音建模技术在钢琴结构教学中的应用研究——基于“结构－声音－艺术表达”模型

胡倩如，刘兆蕊

西安音乐学院，陕西 西安 710061

DOI: 10.61369/TACS.2026040027

摘 要： 本文针对传统钢琴结构教学中机械结构认知与声音理解、艺术表达相脱节的问题，提出并构建了“结构－声音－艺术表达”三元互构理论模型。通过整合虚拟仿真与声音建模技术探索钢琴结构参数如何通过影响钢琴声学特性进而作用于音乐表达的深层机制。文章首先梳理了国内外研究现状，指出当前研究存在闭环断裂、解释性不足和实践脱节等共性缺陷。在此基础上，构建了从“结构认知”到“声音理解”再到“演奏优化”的教学闭环。通过教学实验，验证了该模型在提升学习者结构认知、声音辨识能力及演奏表现力方面的有效性。本研究为钢琴结构教学的数字化转型提供了新的理论视角与实践路径。

关 键 词： 虚拟仿真；声音建模；钢琴结构教学；声音认知；艺术表达；三元互构模型

Research on the Application of Virtual Simulation and Sound Modeling Technology in Piano Structure Teaching — Based on the "Structure-Sound-Artistic Expression" Model

Hu Qianru, Liu Zhaorui

Xi'an Conservatory of Music, Xi'an, Shaanxi 710061

Abstract： Aiming at the problem of disconnection between mechanical structure cognition, sound understanding and artistic expression in traditional piano structure teaching, this paper proposes and constructs a ternary mutual-construction theoretical model of "Structure-Sound-Artistic Expression". By integrating virtual simulation and sound modeling technology, it explores the deep mechanism of how piano structure parameters affect musical expression through influencing piano acoustic characteristics. Firstly, the paper sorts out the research status at home and abroad, and points out the common defects of current research such as closed-loop fracture, insufficient interpretability and disconnection from practice. On this basis, it constructs a teaching closed-loop from "structure cognition" to "sound understanding" and then to "performance optimization". Through teaching experiments, the effectiveness of the model in improving learners' structural cognition, sound recognition ability and performance expressiveness is verified. This study provides a new theoretical perspective and practical path for the digital transformation of piano structure teaching.

Keywords： virtual simulation; sound modeling; piano structure teaching; sound cognition; artistic expression; ternary mutual-construction model

引言

随着数字技术的飞速发展，虚拟仿真与声音建模技术在钢琴机械结构教育领域的应用日益广泛。然而，当前钢琴结构教学中，普遍存在结构认知、声音理解与艺术表达三者相互割裂的问题。学习者虽能熟练掌握钢琴击弦机各零部件名称，却难以理解调整结构参数为何改变音色，更无法将音色变化与特定的音乐风格或艺术表现需求联系起来。

传统的钢琴结构教学多依赖于静态图示或实物拆解，导致结构抽象难以理解、音色变化缺乏直观反馈等问题。而虚拟仿真技术可以动态、立体地展示钢琴机械结构的运动逻辑，声音建模技术则能够实时模拟因机械结构变化所带来的音色差异。但现有研究并没有将二者紧密的结合，未能建立起从物理结构到声学特性再到音乐表演的完整关联。因此，如何整合这两项技术，构建一个展示结构对声音、声音对艺术表达影响的教学模型，成为本文的核心问题。

项目信息：西安音乐学院校级科研项目成果”字样（例：本文为西安音乐学院校级科研项目《虚拟仿真技术与钢琴艺术的互构研究——基于结构教学的知识转译与认知重构》（项目编号：XYKY2025YB04研究成果）。

过程。

(一) 实验对象

选取某音乐学院相关专业本科学学生30名作为实验对象,且均已具备基础的钢琴演奏能力与乐理知识,但尚未系统学习钢琴结构相关知识。实验采用随机分组的方式,将30名学生均分为实验组(15人)与对照组(15人),确保两组在实验前的基础水平无显著差异。

(二) 实验工具

(1) 结构可视化工具“钢琴模拟器”:该工具支持立式钢琴击弦机约2000多个部件的3D动态拆解与联动演示,可直观展示不同触键方式下各部件的运动逻辑。

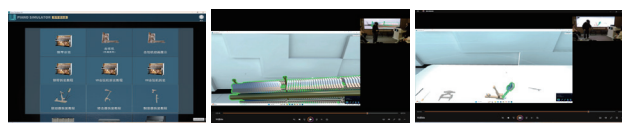


图2 钢琴模拟器操作界面

(2) 声音合成工具 PianoTeq:这是一款基于物理建模的钢琴声音合成软件,能够精确调节弦槌质量、硬度、击弦点等与结构相关的参数,并实时合成声音。同时还支持 MIDI 文件导入与音色预设选择功能,可用于演奏与听辨测试。

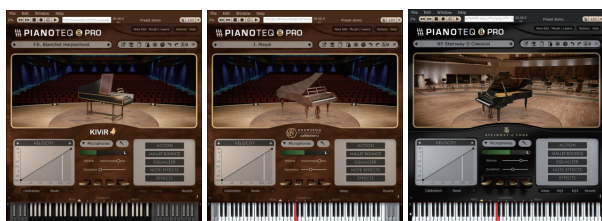


图3 PianoTeq 操作界面

(左:羽管键琴 1733 年;中:普莱耶尔钢琴 1835 年;右:施坦威 D 系列钢琴)

(三) 实验流程

两组学生分别接受为期2课时的不同教学方式:

1. 对照组:

采用传统钢琴结构教学方法,即结合钢琴实物、二维图片及教师口头讲解进行教学。

2. 实验组:

采用基于三元互构的整合教学法。

(1) 结构认知阶段:使用钢琴模拟器动态拆解并观察钢琴击弦机在不同触键方式下的运动逻辑,帮助学生理解各部件的联动关系。

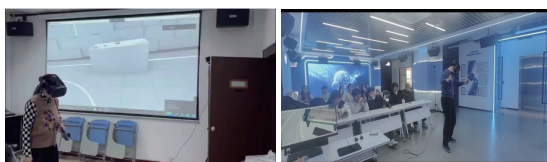


图4 学生佩戴 VR 头显使用钢琴模拟器进行操作

(2) 声音理解阶段:学生在 PianoTeq 中调节与结构相对应的参数(如弦槌质量、击弦点位置等),实时聆听并分析声音频谱、波形等客观指标的变化,建立结构参数与声学特征之间的映射关系。

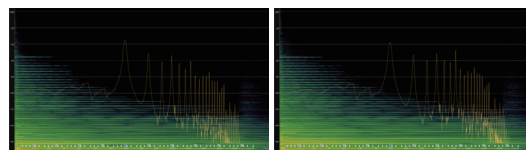


图5 小字1组 c 在不同击弦点状态下呈现的泛音列分布

(左:击弦点位于1/7.7处;右击弦点位于1/24处)

(3) 演奏实践阶段:将巴赫《C大调前奏曲 BWV 846》与肖邦《降b小调夜曲 Op.9 No.1》的 MIDI 乐谱文件导入 PianoTeq。学生在软件中可以为不同风格的音乐片段选择合适的音色预设,并使用电钢琴进行演奏实践,阐述其选择的依据。

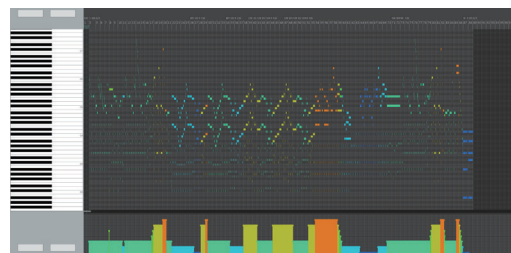


图6 肖邦《降b小调夜曲 Op.9 No.1》MIDI 乐谱

教学干预结束后,对所有学生进行统一的测试与访谈,以评估教学效果。测试包含以下四个维度:

(1) 结构认知能力:通过笔试的形式,测试学生对钢琴击弦机结构与传动原理的理解程度,内容包括部件名称、机械联动逻辑及结构参数对运动状态的影响。

(2) 声音识别能力:设计听辨测试,播放由不同结构参数(弦槌硬度、琴弦长度、弦槌击弦点、制音器位置、音板机械阻抗)合成的音色,要求学生判断对应的参数变化,并解释其声学特征。

(3) 演奏表现力匹配:将两首钢琴曲的 MIDI 文件导入 PianoTeq。学生在软件中聆听不同钢琴音色(如施坦威、普莱耶尔、羽管键琴)演奏上述音乐片段,并选择最合适的一组音色匹配方案。

(4) 访谈调查:最后,对实验组学生进行半结构化访谈。访谈围绕三个方面展开:①学生对三元互构教学模式的接受程度;②该教学模式对学习效率的提升作用;③该教学模式对学习兴趣的激发效果。

(四) 数据分析

1. 定量分析

定量数据来源于测试得到的结构认知笔试成绩、声音听辨测试成绩及演奏匹配测试得分。①采用独立样本 t 检验比较实验组与对照组在各测试指标上的成绩差异;②采用配对样本 t 检验分别比较两组教学对三项能力维度干预的组内效果。定量分析的结果如图7所示。独立样本结果显示,实验组在结构认知、声音识别及演奏匹配三项测试中的平均得分均显著高于对照组。组内配对结果显示,实验组三项指标得分呈依次递增的态势。这一结果与教学流程的递进逻辑相吻合:结构认知阶段为声音理解提供了物理基础,声音理解阶段又为艺术表达提供了声学依据,各阶段学习相互支撑,最终形成整体提升。

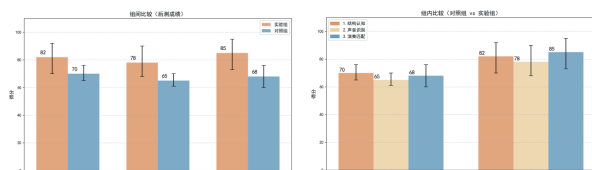


图7 组间和组内定量分析结果 (左: 组间比较; 右: 组内比较)

2. 定性分析

定性数据来源于实验组 15 名学生的半结构化访谈。所有受访学生均对该教学模式表示认可, 认为虚拟仿真与声音建模技术使抽象的结构知识变得更直观易懂; 动手操作、即时反馈的方式显著提高了学习效率。同时, 学生对 VR 拆解和实时声音调节表现出浓厚兴趣, 他们认为使用新兴技术手段能够使原本枯燥的课程变得生动有趣。定性分析结果与定量分析结果相互印证, 表明基于三元互构模型的教学方案获得了学生的认可与积极评价。

四、结论

本文构建的“结构-声音-艺术表达”三元互构理论模型, 整合虚拟仿真与声音建模技术, 为钢琴结构教学提供了新路径。实验表明, 该模型在提升学习者的结构认知、声音辨识能力及演奏匹配能力方面均显著优于传统教学方法。实验组三项测试指标呈现结构认知-声音识别-演奏匹配得分依次递增的态势, 印证了教学流程递进逻辑的合理性。定性分析也显示学生对该模式的接受度、学习效率及兴趣激发均持积极评价。

然而, 本文存在教学实验时长较短 (2 课时)、样本量有限 (30 人) 的局限。未来可从以下方面深入探索: 一是延长实验周期、扩大样本范围, 检验模型的长期教学效果与普适性; 二是将该模型应用于非专业学习者、钢琴调修培训等更广泛的场景, 拓展其应用边界; 三是开发一体化教学平台, 将结构仿真与声音建模技术深度融合, 进一步提升交互体验与教学效率。

参考文献

- [1]Xiao X, Ishii H. Inspect, embody, invent: a design framework for music learning and beyond[C]//Proceedings of the 2016 chi conference on human factors in computing systems. 2016: 5397-5408.
- [2]Anders Thorin, Xavier Boutillon, Jos é Lozada. Modelling the dynamics of the piano action: is apparent success real?. Acta Acustica united with Acustica, 2014, pp.10.
- [3]Simionato R., Fasciani S. and Holm S. (2024). Physics-informed differentiable method for piano modeling. Front. Sig. Proc. 3:1276748.
- [4]Balazs Bank, Juliette Chabassier. Model-based digital pianos: from physics to sound synthesis. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36 (1), pp.11.
- [5] 刘晓楠. 钢琴机械机构的性能分析及对音质的影响研究 [D]. 华南理工大学, 2011.
- [6] 庄晓雪, 邵申弘. 基于 VR 技术进行钢琴结构线上教学的研究 [J]. 乐器, 2023(10):20-23.