

中国音乐学院科研成果出版资助

古琴振动体与共鸣体

声学特性研究

杨帆 著

中央音乐学院出版社

中国音乐学院科研成果出版资助

古琴振动体与共鸣体

声学特性研究

杨帆 著

中央音乐学院出版社

图书在版编目(CIP)数据

古琴振动体与共鸣体声学特性研究/杨帆著. —北京: 中央音乐学院出版社, 2015. 12

ISBN 978 - 7 - 81096 - 712 - 9

I. ①古… II. ①杨… III. ①古琴—声学—研究 IV. ①J632. 31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 173221 号

GŭQín zhèndòngtǐ yǔ gòngmíngtǐ shēngxué tèxìng yánjiū

古琴振动体与共鸣体声学特性研究

杨 帆 著

出版发行: 中央音乐学院出版社

经 销: 新华书店

开 本: 787 × 1092 毫米 16 开 印张: 13. 75

印 刷: 北京宏伟双华印刷有限公司

版 次: 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1—1,000 册

书 号: ISBN 978 - 7 - 81096 - 712 - 9

定 价: 45.00 元

中央音乐学院出版社 北京市西城区鲍家街 43 号 邮编: 100031

发行部: (010) 66418248 66415711 (传真)

目 录

绪 论	(1)
第一节 研究目的与意义	(1)
一、深入了解古琴振动体与共鸣体声学功能	(1)
二、促进古琴音乐文化有效传承	(2)
第二节 “古琴”称谓辨析	(2)
第三节 文献综述与理论基础	(4)
一、弦乐器振动体研究	(4)
二、弦乐器共鸣体研究	(8)
第四节 研究对象与研究方法	(11)
一、具体研究对象及涉及领域	(11)
二、研究方法与研究流程	(12)
第一章 古琴声学构成与音响表现	(15)
第一节 古琴声学系统	(15)
一、古琴声学系统构成	(15)
二、古琴声学系统发音过程	(16)
第二节 古琴声学特性与古琴音响	(18)
一、古琴声学特性	(18)
二、古琴声学特性与古琴音响	(20)
第三节 古人对古琴音响的追求	(25)
第二章 实验设计与实施	(28)
第一节 乐器声学测量综述	(28)
一、弦鸣乐器	(28)
二、体鸣乐器	(30)
三、气鸣乐器	(32)

第二节 古琴声学测量实验内容	(33)
一、琴弦物理特性测量	(34)
二、实验音响素材采录	(35)
三、琴弦声学特性测量	(36)
第三节 实验条件	(36)
一、琴弦物理特性测量	(36)
(一) 实验环境	(36)
(二) 实验器材	(36)
二、实验音响素材采录	(37)
(一) 采录环境	(37)
(二) 采录器材	(38)
(三) 传声器设置方案	(39)
(四) 采录人员	(41)
三、琴弦声学特性测量实验设备参数	(41)
第三章 古琴音响分析方法研究	(43)
第一节 乐器音频信号分析方法	(43)
一、时域特性与频域特性	(43)
二、傅立叶变换	(44)
三、小波变换	(46)
第二节 基于 LabVIEW 的古琴乐音小波包分析程序	(50)
一、LabVIEW 虚拟仪器开发平台	(50)
二、程序的设计	(53)
(一) 核心模块	(53)
(二) 频率与音分转换模块	(55)
第三节 程序性能检测	(60)
一、信号的分解与重构	(60)
二、频谱分析检测	(63)
三、Excel 文件导出数据精度检查	(65)
第四章 古琴振动体声学特性研究	(66)
第一节 古琴琴弦物理性能测量	(66)
一、空弦拉力测量	(68)

二、琴弦延伸率测量	(72)
三、琴弦直径均匀度测量	(74)
第二节 各材质琴弦声辐射特性比较	(76)
一、声压级比较	(76)
(一) 1—7 弦散音 1/3 倍频带声压级比较	(77)
(二) 1—7 弦总声压级比较	(82)
二、琴弦散音动态范围测量	(83)
三、传远特性比较	(84)
第三节 古琴琴弦频谱分析	(85)
一、散音奏法	(85)
二、泛音奏法	(88)
三、按音奏法	(92)
第四节 琴弦振动时间过程分析	(95)
一、振动持续时间比较	(95)
二、起振过程中谐波振幅变化分析	(97)
三、起振过程中谐波频率变化分析	(101)
第五章 古琴共鸣体振动模态研究	(106)
第一节 古琴共鸣体模态分析概述	(106)
一、振动模态分析	(107)
二、有限元法	(107)
三、古琴共鸣体模态分析步骤	(108)
第二节 古琴共鸣体物理特性与音响需求	(116)
一、共鸣体材质物理特性	(116)
二、古琴共鸣体音响需求	(119)
第三节 不同材质古琴共鸣体声学特性比较	(121)
一、模态振型图	(121)
二、模态特征值比较	(124)
(一) 固有频率比较	(124)
(二) 广义质量比较	(127)
三、模态振型比较	(128)
(一) 参与系数比较	(128)

(二) 有效质量比较	(132)
第四节 古琴共鸣体形制与模态分析	(136)
一、模态特征值比较	(137)
(一) 固有频率比较	(137)
(二) 广义质量比较	(139)
二、模态振型比较	(140)
(一) 参与系数比较	(140)
(二) 有效质量比较	(146)
第五节 影响古琴共鸣体声学特性的其他因素	(150)
一、面板厚度变化	(150)
(一) 固有频率	(151)
(二) 参与系数比较	(152)
二、天地柱作用分析	(158)
(一) 固有频率	(158)
(二) 参与系数比较	(160)
总结与讨论	(168)
一、结论归纳	(168)
(一) 小波变换理论在音乐信号分析中的应用	(168)
(二) 古琴琴弦物理特性测量	(169)
(三) 琴弦声辐射特性	(169)
(四) 琴弦频谱分析	(170)
(五) 琴弦振动时间过程分析	(171)
(六) 共鸣体振动模态研究	(171)
二、后续研究设想	(173)
参考文献	(174)
附录	(181)
附录一 不同材质古琴琴弦声瀑比较图	(181)
附录二 六种形制古琴共鸣体前 10 阶模态振型图	(185)
附录三 中国计量科学研究院力学与声学所全消声室录音现场图	(191)
附录四 采录乐器信息记录表	(193)

附录五	演奏员信息记录表	(194)
附录六	演奏员录音情况问卷调查表	(196)
附录七	中国计量科学研究院力学与声学研究所全消声室校准证书	(198)
附录八	本次研究参考的国家及行业标准	(202)
后 记		(203)

表 格 索 引

1. 表 0-1 共鸣体实验模型简况表	(12)
2. 表 2-1 弦鸣乐器声学测量文献列表	(28)
3. 表 2-2 体鸣乐器声学测量文献列表	(30)
4. 表 2-3 气鸣乐器声学测量文献列表	(32)
5. 表 4-1 古琴钢丝缠弦拉力值	(70)
6. 表 4-2 古琴合成纤维缠弦拉力值 (N)	(70)
7. 表 4-3 古琴蚕丝缠弦拉力值 (N)	(70)
8. 表 4-4 钢丝缠弦延伸率	(73)
9. 表 4-5 合成纤维缠弦延伸率	(73)
10. 表 4-6 蚕丝缠弦延伸率	(73)
11. 表 4-7 钢丝缠弦直径均匀度	(74)
12. 表 4-8 合成纤维缠弦直径均匀度	(75)
13. 表 4-9 蚕丝缠弦直径均匀度	(75)
14. 表 4-10 1 弦 1/3 倍频带声压级表	(78)
15. 表 4-11 2 弦 1/3 倍频带声压级表	(78)
16. 表 4-12 3 弦 1/3 倍频带声压级表	(79)
17. 表 4-13 4 弦 1/3 倍频带声压级表	(79)
18. 表 4-14 5 弦 1/3 倍频带声压级表	(79)
19. 表 4-15 6 弦 1/3 倍频带声压级表	(80)
20. 表 4-16 7 弦 1/3 倍频带声压级表	(80)
21. 表 4-17 不同材质琴弦散音总声压级表	(82)
22. 表 4-18 钢丝缠弦散音动态范围表	(83)
23. 表 4-19 琴弦散音传远特性差异表	(85)
24. 表 4-20 琴弦各分段振动关系表	(91)
25. 表 4-21 琴弦振动持续时间表	(96)

26. 表 4-22 钢丝缠弦 A1 起振振幅变化表	(98)
27. 表 4-23 钢丝缠弦 A2 起振振幅变化表	(98)
28. 表 4-24 合成纤维缠弦 B1 起振振幅变化表	(99)
29. 表 4-25 合成纤维缠弦 B2 起振振幅变化表	(99)
30. 表 4-26 基音起振频率变化表	(101)
31. 表 4-27 第 1 倍音起振频率变化表	(101)
32. 表 4-28 第 2 倍音起振频率变化表	(102)
33. 表 4-29 第 3 倍音起振频率变化表	(102)
34. 表 4-30 第 4 倍音起振频率变化表	(102)
35. 表 5-1 “玉壶冰”模型网格划分质量表	(113)
36. 表 5-2 实验所用木材工程常数表 (单位: Mpa)	(119)
37. 表 5-3 不同材质“九霄环佩”模型固有频率表	(124)
38. 表 5-4 不同材质模型固有频率曲线表	(126)
39. 表 5-5 不同材质“九霄环佩”模型广义质量表	(127)
40. 表 5-6 不同材质“九霄环佩”模型参与振动系数表 (X 轴方向)	(128)
41. 表 5-7 不同材质“九霄环佩”模型参与振动系数表 (Y 轴方向)	(129)
42. 表 5-8 不同材质“九霄环佩”模型参与振动系数表 (Z 轴方向)	(130)
43. 表 5-9 面桐底杉模型有效振动质量表	(132)
44. 表 5-10 面桐底梓模型有效振动质量表	(133)
45. 表 5-11 面桐底楸模型有效振动质量表	(133)
46. 表 5-12 面桐底桐模型有效振动质量表	(134)
47. 表 5-13 面杉底杉模型有效振动质量表	(134)
48. 表 5-14 不同形制共鸣体模型固有频率表	(137)
49. 表 5-15 不同形制共鸣体模型固有频率曲线表	(138)
50. 表 5-16 不同形制共鸣体模型广义质量表	(139)
51. 表 5-17 不同形制模型参与振动系数表 (X 轴方向)	(141)
52. 表 5-18 不同形制模型参与振动系数表 (Y 轴方向)	(142)
53. 表 5-19 不同形制模型参与振动系数表 (Z 轴方向)	(144)
54. 表 5-20 伏羲式模型有效振动质量表	(146)
55. 表 5-21 神农式模型有效振动质量表	(146)
56. 表 5-22 凤势式模型有效振动质量表	(147)
57. 表 5-23 连珠式模型有效振动质量表	(148)



58. 表 5-24 蕉叶式模型有效振动质量表	(148)
59. 表 5-25 仲尼式模型有效振动质量表	(149)
60. 表 5-26 不同形制模型有效质量轴向、阶次排序表	(150)
61. 表 5-27 15mm 厚度面板不同形制模型固有频率表	(151)
62. 表 5-28 15mm 厚度面板不同形制模型参与振动系数表 (X 轴方向)	(152)
63. 表 5-29 15mm 厚度面板不同形制模型参与振动系数表 (Y 轴方向)	(154)
64. 表 5-30 15mm 厚度面板不同形制模型参与振动系数表 (Z 轴方向)	(156)
65. 表 5-31 无天地柱不同形制模型固有频率表	(158)
66. 表 5-32 仲尼式模型固有频率比较表	(160)
67. 表 5-33 无天地柱不同形制模型参与振动系数表 (X 轴方向)	(161)
68. 表 5-34 无天地柱不同形制模型参与振动系数表 (Y 轴方向)	(162)
69. 表 5-35 无天地柱不同形制模型参与振动系数表 (Z 轴方向)	(164)
70. 附录四 采录乐器信息记录表	(193)
71. 附录五 演奏员信息记录表	(194)
72. 附录六 演奏员录音情况问卷调查表	(196)

图 片 索 引

1. 图 2-1 实验流程图	(34)
2. 图 2-2 卧式古琴琴弦检测器结构图	(37)
3. 图 2-3 录音传声器位置正视图	(39)
4. 图 2-4 录音传声器位置侧视图	(40)
5. 图 2-5 录音传声器位置俯视图	(40)
6. 图 3-1 信号时域与频域分析图	(44)
7. 图 3-2 小波变换尺度放大示意图	(47)
8. 图 3-3 信号分析窗口分割示意图	(49)
9. 图 3-4 虚拟仪器系统音频信号处理框图	(51)
10. 图 3-5 乐音小波包分析程序前面板图	(53)
11. 图 3-6 乐音小波包分析程序框图	(53)
12. 图 3-7 音频信号处理小波包分解图	(54)
13. 图 3-8 小波包分解树与频率顺序图	(55)
14. 图 3-9 LabVIEW 频率转换音分应用程序框图	(58)
15. 图 3-10 音区分段与移位寄存模块图	(58)
16. 图 3-11 变化音记号与音分比较模块图	(59)
17. 图 3-12 叠加模块图	(60)
18. 图 3-13 信号分解模块程序框图	(61)
19. 图 3-14 数据读入模块程序框图	(61)
20. 图 3-15 重构模块示意图	(62)
21. 图 3-16 Audition CS6 软件生成信号图	(64)
22. 图 3-17 复合音频谱图	(64)
23. 图 4-1 岳山压力示意图	(72)
24. 图 4-2 散音奏法 1 弦频谱图	(86)
25. 图 4-3 散音奏法 7 弦频谱图	(87)

26. 图 4-4 泛音奏法 A1 琴弦 C4 音频谱图	(89)
27. 图 4-5 按音奏法 2 弦 7 徽乐音频谱图	(92)
28. 图 4-6 按音奏法 6 弦 7 徽乐音频谱图	(93)
29. 图 4-7 散音奏法 A1 琴弦 C3 音波形图	(97)
30. 图 5-1 “九霄环佩”琴有限元模型图	(110)
31. 图 5-2 “大圣遗音”琴有限元模型图	(110)
32. 图 5-3 “玉玲珑”琴有限元模型图	(111)
33. 图 5-4 “飞泉”琴有限元模型图	(111)
34. 图 5-5 “蕉林听雨”琴有限元模型图	(112)
35. 图 5-6 “玉壶冰”琴有限元模型图	(112)
36. 图 5-7 面桐底杉材质“九霄环佩”模型前 16 阶模态振型图	(123)
37. 图 5-8 不同形制模型第 5 阶面板模态振型图	(142)
38. 图 5-9 不同形制模型第 6 阶底板模态振型比较图	(144)
39. 图 5-10 不同形制模型第 5 阶模态振型侧视比较图	(145)
40. 图 5-11 连珠式模型第 4、9 阶模态振型比较图	(154)
41. 图 5-12 蕉叶式模型第 6、15 阶模态振型比较图	(156)
42. 图 5-13 仲尼式模型第 10、12 阶模态振型比较图	(157)
43. 图 5-14 凤势式模型第 11 阶模态振型剖面图	(162)
44. 图 5-15 神农式模型第 16 阶模态振型剖面图	(164)
45. 图 5-16 蕉叶式模型第 12、18 阶模态振型比较图	(165)
46. 附录一 不同材质古琴琴弦声瀑比较图	(181)
47. 附录二 六种形制古琴共鸣体前 10 阶模态振型图	(185)
48. 附录三 中国计量科学研究院力学与声学所全消声室录音现场图	(191)

公 式 索 引

1. 式 2-1 琴弦延伸率计算公式	(35)
2. 式 2-2 琴弦总拉力计算公式	(35)
3. 式 3-1 十二平均律半音频率比公式	(56)
4. 式 3-2 十二平均律半音音分计算公式	(56)
5. 式 3-3 音分计算公式	(56)
6. 式 3-4 频率 - 音分转换计算公式	(57)
7. 式 3-5 测量频率与标准频率音分计算公式 (1)	(57)
8. 式 3-6 测量频率与标准频率音分计算公式 (2)	(57)
9. 式 4-1 琴弦横振动基频计算公式	(67)
10. 式 4-2 琴弦纵振动基频计算公式	(67)
11. 式 4-3 琴弦扭转振动基频计算公式	(67)
12. 式 4-4 古琴琴弦振动频率计算公式	(69)
13. 式 4-5 古琴琴弦总拉力计算公式	(69)
14. 式 4-6 古琴琴弦延伸率计算公式	(72)
15. 式 4-7 琴弦 1-7 弦各弦总声压级计算公式	(82)
16. 式 5-1 木材密度计算公式	(118)

绪 论

古琴，又称“琴”、“七弦琴”、“中国琴”。它是千百年来中国传统文化与人们精神追求的物质载体，以独特的音响表现承载着中华民族一脉相承的文化情趣和审美感受。古人有云：“八音之中，惟弦为最，而琴为之首。”^① 古琴艺术自先秦延续至今日，不断有琴家名士通过音乐与文字记述着他们对古琴音响的感知与追求，表达着他们对人生、社会、历史、自然等多个方面的感受，古琴音乐文化，也成为中华优秀传统文化博大精深思想内涵的典型代表。

第一节 研究目的与意义

一、深入了解古琴振动体与共鸣体声学功能

古琴音乐受儒释道三家哲学思想的影响由来已久。受乐器形制、乐曲内涵、审美要求等方面的影响，古琴音乐风格倾向于恬静、含蓄、淡柔、典雅。这种音乐风格的形成，与古琴特殊的声学特性是分不开的。就形制构造而言，对古琴声学特性起主要作用的是振动体及共鸣体两大部分。

“乐器声学所关注的问题，主要是从声学角度探讨各种乐器的发声机理，并对其音响性能的改善进行研究。从声学角度看，世界上任何完备的乐器都包含以下四个部分，即振动体、激励体、共鸣体和调控装置。……振动体即产生振动的物体，如弦乐器的琴弦。共鸣体即扩散振动体振动能量的物体，如弦乐器的琴箱。”^② 古琴振动体即是指古琴琴弦，古琴共鸣体是指由面板和底板两个大部件构成的振动系统。只有彻底了解古琴振动体和共鸣体的声学特性，才能有效把握古琴音响变化的规律。很久以前，古人即认识到古琴振动体与共鸣体对古琴音响表现的重要性，从制作选材、加工工艺等多个方面做了大量探索，取得了丰富的实践经验。在当前的音乐声

① [汉] 桓谭：《新论·琴道篇》，上海人民出版社，1977年版，第71页。

② 韩宝强：《音的历程——现代音乐声学导论》，中国文联出版社，2003年版，第135页。

学研究中,借助自然科学研究中的先进分析手段,尝试从更加微观的物理层面入手,在古琴振动特性、声学特性等方面得到比以往更加细微的观察,是古琴音乐文化发展到当代,研究者们应当拓展的一个认识领域。

古琴激励体是演奏者弹奏琴弦使用的手指。古琴振动体与共鸣体虽然在古琴声学表现中起决定性的作用,但是不同激励方式同样会使古琴音响效果发生较大变化。受不同流派演奏手法、演奏者手指条件差异等诸多因素影响,实际演奏中,琴家们的激励方式往往带有鲜明的个性特点,又由于这部分内容较多地涉及到演奏美学与演奏心理学,实践中带有较强的主观性与随机性,较难总结出影响古琴音响表现的客观规律,因此在本文中不做特别研究。

二、促进古琴音乐文化有效传承

随着古琴音乐文化主要的传承群体——文人阶层的消亡、新时期欣赏者审美观念改变等多方面的共同影响,古琴音乐这一延续近三千年的灿烂文化,如今却面临着严峻的传承危机。2003年,随着中国古琴艺术被联合国教科文组织列入“人类口头和非物质文化遗产代表作”,古琴音乐这一饱经风霜的文化瑰宝,正被全世界越来越多的人所了解。当前,本着挽救优秀文化遗产的愿望,国家、社会、团体、个人等多个层面都在强调传承古琴文化的必要性与紧迫性。众多学者在琴史、琴论、琴制、琴谱、古琴美学等多个方面都做了大量研究工作,视野开阔,成果丰硕,在涉及古琴音乐的多个方面都有所收获。但是,采用音乐声学研究方法,从乐器声学角度出发,对古琴物理特性及声学特性的研究较为鲜见。

此次研究使用物理测量与分析手段,分析古琴振动体与共鸣体在振动过程、振动状态等方面的特点,结合古琴音质表现找出物理特性与声学特性的相关性,将物理振动数据与具体音响表现联系起来,找出乐器形制与声学特性之间的客观联系,为深入了解古琴振动及发声规律,全面评价古琴音响表现提供科学依据。因此,研究成果将完善和补充已有古琴研究成果,进一步深化与拓宽对古琴音乐文化的综合认识。

第二节 “古琴”称谓辨析

“古琴”这一称谓,是当代琴家使用最为频繁的。但不同时代、不同学者有着多种使用习惯,文献中较常见的就有“琴”、“七弦琴”、“中国琴”、“瑶琴”、“素琴”等多种命名。对于这些名称,学者们的争论大多集中于古琴“古”字的历史源

流与实际意义。20世纪80年代,吉联抗和许光毅两位先生就先后在《人民音乐》杂志上作过讨论。

1980年,吉联抗先生发表文章称:“现在所说的‘古琴’,本来只叫‘琴’……至于‘古琴’之称,则是解放以后才出现的。”^①对于这种提法,许光毅先生发表文章指出,“今虞琴社”在1937年编印的琴刊中就有“古琴”称谓。此外,在解放前举行的两次“许光毅国乐独奏会”、由“仲乐音乐馆”主办的两次“国乐演奏会”,节目单也都印为古琴独奏。可以认为“古琴”这个名称早在解放前就已存在。^②之后,吉联抗先生发表《关于“古琴”名称的补充》一文,承认了自己的疏漏并补充到:“一、1919年北京大学音乐研究会即设有‘古琴组’,可见‘古琴’这个名称是伴随着现代历史的开始而出现的。二、在唐人的诗句中有时也用‘古琴’二字,……此处‘古琴’即是指琴。”^③这就产生了一个疑问,一方面吉联抗先生认为古琴名称是随现代历史出现的,另一方面亦举例说明古代已有古琴这种称谓。这个疑问也引起了其他学者的关注。

针对“琴”之名何时转化为“古琴”,孙继南先生提出了自己的看法:“古琴在历史上一直称作‘琴’,后来又名‘七弦琴’。‘古琴’的称谓是在唐代出现的。”^④谢孝苹先生提出:“古琴之名,由来已尚。……早在汉魏六朝,人们称呼这种弦乐器为古琴。”^⑤王秀庭、冯光钰两位先生则认为:“‘古琴’之名是宋代才有的称谓。”^⑥王鑫先生认为:“琴在唐宋后即被称为古琴。”^⑦杨和平先生认为:“1919年北京大学音乐研究会所设古琴组将‘琴’首称为‘古琴’。”^⑧李小戈先生提出:“古琴的称谓从‘琴’到‘古琴’是一种古汉语向现代汉语演变的表现,那么1917年起提倡白话文,反对文言文的‘文学革命’极有可能是‘古琴’这个称谓确立并为大家接受的一个契机。据此,笔者认为,1919年在新文化运动的影响下,于北京成立的由蔡元培任会长的北京大学音乐研究会设‘古琴组’,首次运用‘古琴’这个称谓,

① 吉联抗:《从“琴台”说到“古琴”》,《人民音乐》1980年第10期,第35页。

② 许光毅:《古琴的名称在解放前早已存在》,《人民音乐》1981年第5期,第28页。

③ 吉联抗:《关于“古琴”名称的补充》,《人民音乐》1982年第2期,第62页。

④ 孙继南:《中外名曲欣赏》,山东教育出版社,1985年版,第3页。

⑤ 谢孝苹:《雷巢文存(下)》,中国文联出版社,1999年版,第714—715页。

⑥ 王秀庭、冯光钰:《现代视野中的古琴艺术》,《中国音乐》2008年第2期,第6页。

⑦ 王鑫:《齐特琴和亚洲箏族乐器》,《乐器》2012年第1期,第52页。

⑧ 杨和平:《研琴史简述》,《乐器》1990年第2期,第29页。