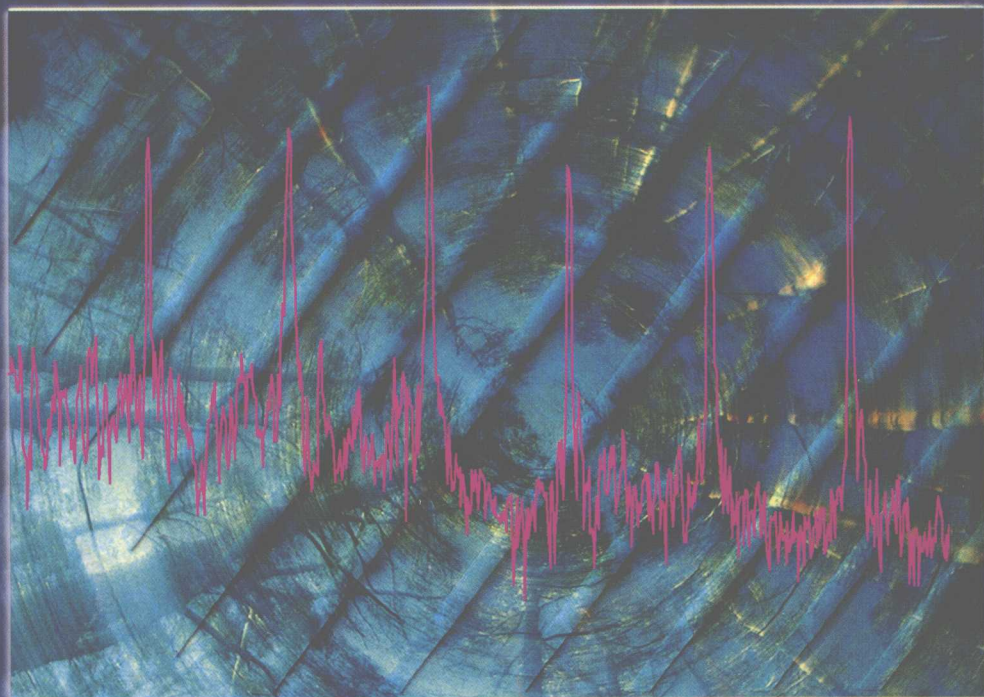


刘镇波 沈 隽 著  
刘一星 主审



# 共鸣板用材的振动特性 与钢琴的声学品质



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 共鸣板用材的振动特性 与钢琴的声学品质

刘镇波 沈 隽 著  
刘一星 主审

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

云杉属、泡桐属等树种木材具有优良的声振动特性,已被广泛用做乐器和声学器具的共鸣音板。本书在研究 8 种云杉属木材的构造特征与其振动特性之间的内在关系的基础上,研究了 4 种云杉属木材制作的钢琴共鸣板的振动特性,并对 8 台实验用钢琴的声学品质进行了主观评价、客观评价及生理指标评价,分析声学品质评价结果与共鸣板振动特性之间的内在关系;最后,介绍了钢琴共鸣板的客观评价方法及共鸣板用材的客观选取方法。全书追踪研究了由云杉属木材微观构造特征到钢琴产品(即云杉属木材—共鸣板—音板—钢琴声学品质)的整个过程。

本书可供木材科学、乐器学、钢琴制造、乐器声学品质评价等领域的工程技术人员、科研人员和高、中等专业院校师生使用与参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

共鸣板用材的振动特性与钢琴的声学品质/刘镇波,沈隽著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-024612-7

I. 共… II. ①刘…②沈… III. 钢琴—板材—研究 IV. TS953.35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 079212 号

责任编辑:周巧龙 沈晓晶/责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏 杰 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 5 月第一次印刷 印张: 15 1/4

印数: 1—1 000 字数: 295 000

定价: 46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 前 言

云杉属、泡桐属等树种木材是制作乐器共鸣部件的重要材料，其声振动性能在很大程度上决定了乐器的声学品质。目前许多乐器共鸣板制作的从业人员对共鸣板用材的材质、共鸣板的振动特性不甚了解，多年来乐器制作行业在共鸣板用木材的选取上，主要依赖于乐器技师的观、掂、敲、听等方式进行主观评判，并没有具体、系统的科学依据，这就使乐器质量的提高、选材的自动化以及出材率的提高受到限制。

钢琴因其宽广的音域、优美的乐音、宽广的适用性及可适合演奏各种多声（和声的、复调的）形式题材乐曲等优越的声学性能，素有“乐器之王”的美誉。钢琴结构复杂、精密，是应用木材（一般为云杉属树种木材）做共鸣板的最典型、最重要的西洋乐器之一。钢琴的共鸣元件称为音板，是由共振板（也称共鸣板）、肋木、音板框等部件组成，其中共鸣板为一块薄的板片，通常是由80~100mm宽的木材板条拼粘在一起组成的。钢琴的声源虽然来自琴弦，但如果去掉音板，那么我们听到的仅仅是极微弱的钢丝振动之声，决然不是钢琴的优美乐音。因此，音板的振动和声学特性直接影响到钢琴的音质和品质，可以说，共鸣板及共鸣板用木材的声振动特性（声振动效率、振动频谱特性及发音效果的稳定性等）是决定钢琴声学品质的决定性因素之一。

钢琴及其他用木材制作共鸣元件的乐器，对木材的要求不同于其他木材应用领域，不但要求木材不能有开裂、节子、虫眼等缺陷，而且对木材的密度、年轮宽度、年轮数及微观特征等都有具体的要求。因此，适合于制作乐器共鸣板的木材只局限于少数的几种木材及这些木材原木中的某些部位。从目前的生产来看，用于生产乐器共鸣板的原木出材率一般为10%~20%，这也说明了对用做乐器共鸣板的木材要求非常苛刻。而且当前人类面临着世界性的木材资源匮乏，适合制作乐器音板的木材更是少之又少，这不但影响着乐器质量的提高，而且影响着乐器行业的可持续发展。

因此，解明木材的结构特征与其振动特性之间的内在关系，建立乐器共鸣板用材的客观选取及乐器共鸣板的客观评价方法，对实现钢琴及其他乐器共鸣板声学品质的客观评价、共鸣板用木材的客观选取，节约现有的珍贵共鸣板用木材资源有积极作用，并对提高我国钢琴产品质量与档次，提高其附加值和更大的经济效益具有积极的意义，同时，可促进我国乐器制造总体水平的提高及进一步增强我国乐器产品在国际市场上的竞争力。

本书作者刘镇波博士、沈隽博士在导师刘一星教授的指导下，在国家自然科学基金（项目编号：30371128、30471356）、东北林业大学青年创新基金项目（项目编号：07014）及高校学科创新引智计划项目（项目编号：B08016）等的资助下，在国际上首次追踪研究了云杉属木材微观构造特征与振动特性之间的内在关系、共鸣板的振动特性、最终钢琴产品的声学品质（即云杉属木材—共鸣板—音板—钢琴声学品质的整个过程）。本书总结了近 10 年的研究成果，主要内容为：

（1）介绍云杉属木材的物理特征、宏观特征、解剖分子形态特征等构造特征与其振动特性之间的内在关系（第 1 章至第 5 章）；

（2）介绍用云杉属木材制作的钢琴共鸣板的振动特性及钢琴音板的振动模型（第 6 章至第 8 章）；

（3）介绍以云杉属木材为音板的钢琴的声学品质主观评价、客观评价及生理指标评价方法，并分析声学品质评价结果与共鸣板振动特性之间的内在关系（第 9 章、第 10 章）；

（4）介绍钢琴共鸣板的客观评价方法及共鸣板用材的客观选取方法（第 11 章）。

本书由东北林业大学刘镇波、沈隽共同撰写，其中绪论、第 6 章至第 11 章由刘镇波执笔；第 1 章至第 5 章由沈隽执笔；第 12 章由刘镇波、沈隽共同执笔。东北林业大学刘一星教授审阅了全书，并提出了许多宝贵的意见。

由于著者水平所限，书中欠妥和疏漏之处在所难免，敬请同行和广大读者不吝批评指正。

著 者

2009 年 4 月

# 目 录

## 前言

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| <b>第 0 章 绪论</b> .....               | 1  |
| 0.1 木材声学的主要研究内容 .....               | 1  |
| 0.1.1 乐器共鸣板用木材的声学特性研究 .....         | 1  |
| 0.1.2 基于声学特性的木质材料无损检测研究 .....       | 2  |
| 0.1.3 建筑中木质材料的声学特性研究 .....          | 3  |
| 0.2 木材的声振动特性及性能评价 .....             | 3  |
| 0.2.1 木材的基本振动方式 .....               | 4  |
| 0.2.2 木材声振动性能的主要指标 .....            | 6  |
| 0.2.3 乐器共鸣板用木材的声振动性能评价 .....        | 8  |
| 0.3 乐器共鸣板用木材的声振动特性研究进展 .....        | 11 |
| 0.3.1 国内研究进展 .....                  | 11 |
| 0.3.2 国外研究进展 .....                  | 12 |
| 0.3.3 合理高效利用乐器共鸣板用木材的重要性 .....      | 16 |
| 0.4 乐器(钢琴)共鸣板的振动特性研究 .....          | 16 |
| 0.5 钢琴的结构与声学系统 .....                | 17 |
| 0.5.1 钢琴的音域 .....                   | 18 |
| 0.5.2 钢琴的结构 .....                   | 19 |
| 0.5.3 钢琴的声学系统 .....                 | 22 |
| 0.5.4 当前我国钢琴行业发展状况 .....            | 24 |
| 0.6 钢琴声学品质的研究 .....                 | 24 |
| 0.6.1 钢琴声学品质的评价 .....               | 25 |
| 0.6.2 音乐(钢琴音响效果)对人体生理、心理反应的影响 ..... | 25 |
| 0.7 本书的主要内容 .....                   | 26 |
| 0.8 本书中术语及代号的说明 .....               | 27 |
| <b>第 1 章 云杉属木材物理特征与振动特性</b> .....   | 28 |
| 1.1 木材声振动特性及物理特征的测定 .....           | 28 |
| 1.1.1 云杉属木材声振动特性的测定 .....           | 28 |
| 1.1.2 木材物理特征的测定 .....               | 31 |
| 1.2 云杉属木材的相对密度与振动特性之间的关系 .....      | 32 |

|            |                                      |           |
|------------|--------------------------------------|-----------|
| 1.2.1      | 木材相对密度与动弹性模量、比动弹性模量之间的关系·····        | 33        |
| 1.2.2      | 与木材相对密度相关的比动弹性模量和动力学损耗角正切之间的关系·····  | 35        |
| 1.2.3      | 木材相对密度与 $E'/G$ 值之间的关系·····           | 36        |
| 1.2.4      | 木材相对密度与 $\tan\delta/E'$ 之间的关系·····   | 37        |
| 1.3        | 云杉属木材的结晶度与振动特性之间的关系·····             | 38        |
| 1.3.1      | 云杉属木材结晶度与动弹性模量、比动弹性模量之间的关系·····      | 38        |
| 1.3.2      | 结晶度对云杉属木材振动效率的影响·····                | 40        |
| 1.3.3      | 结晶度对云杉属木材振动品质——音色的影响·····            | 40        |
| 1.4        | 本章小结·····                            | 42        |
| <b>第2章</b> | <b>云杉属木材宏观特征与振动特性·····</b>           | <b>44</b> |
| 2.1        | 云杉属木材宏观特征的测定·····                    | 44        |
| 2.2        | 云杉属木材的生长轮宽度及其变异与振动特性·····            | 45        |
| 2.2.1      | 木材生长轮宽度与声振动性能参数之间的关系·····            | 45        |
| 2.2.2      | 木材生长轮宽度变异与声振动性能参数之间的关系·····          | 49        |
| 2.3        | 云杉属木材的晚材率及其变异与振动特性·····              | 56        |
| 2.3.1      | 木材晚材率与声振动性能参数之间的关系·····              | 56        |
| 2.3.2      | 木材晚材率变异与声振动性能参数之间的关系·····            | 59        |
| 2.4        | 云杉属木材纵向与径向振动特性参数之间关系的研究·····         | 67        |
| 2.4.1      | 各树种木材纵向和径向振动参数的直观比较·····             | 67        |
| 2.4.2      | 各树种木材纵向和径向振动参数的相关性分析·····            | 70        |
| 2.5        | 本章小结·····                            | 73        |
| <b>第3章</b> | <b>云杉属木材解剖分子形态特征与振动特性·····</b>       | <b>75</b> |
| 3.1        | 云杉属木材解剖分子形态特征的测定·····                | 75        |
| 3.1.1      | 木材管胞长度和宽度解剖特征的测定·····                | 75        |
| 3.1.2      | 平均纤丝角的测定·····                        | 75        |
| 3.1.3      | 木材胞壁率和管胞直径的测定·····                   | 77        |
| 3.1.4      | 木材解剖分子形态特征检测新方法简介·····               | 77        |
| 3.2        | 云杉属木材管胞长度、宽度与振动特性·····               | 79        |
| 3.2.1      | 管胞长度、宽度与动弹性模量、比动弹性模量之间的关系·····       | 79        |
| 3.2.2      | 管胞长度、宽度与声辐射品质常数之间的关系·····            | 81        |
| 3.2.3      | 管胞长度、宽度与动力学损耗角正切、每振动周期能量损耗之间的关系····· | 82        |
| 3.2.4      | 管胞长度、宽度对云杉属木材振动音色的影响·····            | 83        |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 3.3 云杉属木材管胞壁厚、壁腔比与振动特性                    | 84  |
| 3.3.1 各树种木材管胞的壁厚及其与动弹性模量、比动弹性模量之间的关系      | 84  |
| 3.3.2 管胞壁厚度与声辐射品质常数之间的关系                  | 85  |
| 3.3.3 管胞壁厚度与动力学损耗角正切、每振动周期能量损耗、声阻抗之间的关系   | 86  |
| 3.3.4 管胞壁厚度对木材振动音色的影响                     | 87  |
| 3.3.5 各树种木材管胞的壁腔比及其与动弹性模量、比动弹性模量之间的关系     | 88  |
| 3.3.6 管胞的壁腔比与声辐射品质常数之间的关系                 | 90  |
| 3.3.7 管胞壁腔比与动力学损耗角正切、每振动周期能量损耗、声阻抗之间的关系   | 92  |
| 3.3.8 管胞壁腔比对木材振动音色的影响                     | 93  |
| 3.4 云杉属木材胞壁率与振动特性                         | 93  |
| 3.4.1 各树种木材细胞的胞壁率及其与动弹性模量、比动弹性模量之间的关系     | 93  |
| 3.4.2 木材细胞胞壁率与声辐射品质常数之间的关系                | 96  |
| 3.4.3 木材细胞胞壁率与动力学损耗角正切、每振动周期能量损耗、声阻抗之间的关系 | 96  |
| 3.4.4 木材细胞的胞壁率对木材振动音色的影响                  | 98  |
| 3.5 云杉属木材纤丝角与振动特性                         | 98  |
| 3.5.1 各树种纤丝角大小的比较及其与动弹性模量、比动弹性模量之间的关系     | 99  |
| 3.5.2 纤丝角对云杉属木材振动效率的影响                    | 100 |
| 3.5.3 纤丝角对木材振动音色的影响                       | 103 |
| 3.6 本章小结                                  | 103 |
| <b>第4章 云杉属木材细胞排列方向的FFT图谱解析</b>            | 106 |
| 4.1 各树种木材管胞径向排列的特征参数                      | 106 |
| 4.2 各树种木材细胞实际排列情况与特征参数的对比                 | 108 |
| 4.3 各树种木材管胞径向排列角度与振动特性参数的关系               | 112 |
| 4.4 本章小结                                  | 113 |
| <b>第5章 云杉属木材振动性能的综合评价</b>                 | 115 |
| 5.1 云杉属木材各项性能指标的主成分分析                     | 115 |
| 5.1.1 纵向试件各项性能指标的主成分分析                    | 115 |
| 5.1.2 径向试件各项性能指标的主成分分析                    | 119 |



|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 5.2 基于综合评分法的云杉属木材振动性能的比较分析 .....        | 121 |
| 5.2.1 综合评分法的计算方法 .....                  | 121 |
| 5.2.2 纵向试件振动性能指标的综合评分比较分析 .....         | 121 |
| 5.2.3 径向试件振动性能指标的综合评分比较分析 .....         | 124 |
| 5.3 基于综合坐标法的云杉属木材振动性能的比较分析 .....        | 126 |
| 5.3.1 综合坐标法的计算方法 .....                  | 126 |
| 5.3.2 纵向试件振动性能指标的综合坐标评定值比较分析 .....      | 126 |
| 5.3.3 径向试件振动性能指标的综合坐标评定值比较分析 .....      | 128 |
| 5.4 本章小结 .....                          | 130 |
| <b>第6章 实际尺寸钢琴共鸣板用木材的振动特性检测与分选</b> ..... | 132 |
| 6.1 实际尺寸木材振动特性测定的基础研究 .....             | 132 |
| 6.2 共鸣板素材的准备 .....                      | 133 |
| 6.3 共鸣板素材的振动性能分选 .....                  | 134 |
| 6.3.1 共鸣板素材振动参数的测定 .....                | 135 |
| 6.3.2 木材综合振动特性的区分 .....                 | 135 |
| 6.4 本章小结 .....                          | 143 |
| <b>第7章 钢琴共鸣板的振动特性</b> .....             | 144 |
| 7.1 钢琴共鸣板的制作 .....                      | 144 |
| 7.2 共鸣板振动特性的测定方法 .....                  | 144 |
| 7.2.1 钢琴共鸣板振动模式测定 .....                 | 144 |
| 7.2.2 钢琴音板振动信号响应时间测定 .....              | 146 |
| 7.3 钢琴共鸣板基本振动理论 .....                   | 146 |
| 7.4 共鸣板振动模态的识别与分析 .....                 | 150 |
| 7.4.1 共鸣板的振动频率归属 .....                  | 150 |
| 7.4.2 共鸣板的弹性模量 .....                    | 151 |
| 7.4.3 共鸣板的纵波传播速度 .....                  | 152 |
| 7.5 共鸣板边部剩余试件的振动性能分析 .....              | 154 |
| 7.6 肋木对共鸣板振动响应速率的影响 .....               | 156 |
| 7.7 钢琴音板的振动响应时间分析 .....                 | 158 |
| 7.8 本章小结 .....                          | 161 |
| <b>第8章 钢琴音板振动模态的检测与分析</b> .....         | 163 |
| 8.1 钢琴音板振动模态检测方法 .....                  | 163 |
| 8.2 钢琴音板的振动模态分析 .....                   | 165 |
| 8.3 钢琴音板的输入阻抗 .....                     | 168 |
| 8.3.1 输入阻抗的概念 .....                     | 168 |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| 8.3.2 输入阻抗的测定方法 .....                        | 168        |
| 8.3.3 钢琴音板的输入阻抗特性曲线 .....                    | 169        |
| 8.4 本章小结 .....                               | 172        |
| <b>第9章 钢琴的声学品质评价</b> .....                   | <b>173</b> |
| 9.1 钢琴的制作 .....                              | 173        |
| 9.2 钢琴声学品质的主观评价 .....                        | 173        |
| 9.2.1 主观评价现场环境 .....                         | 174        |
| 9.2.2 主观评价表制定与主观评价原则 .....                   | 175        |
| 9.2.3 演奏曲目、评价专家、演奏者与录音 .....                 | 176        |
| 9.2.4 主观评价的数据分析 .....                        | 177        |
| 9.3 钢琴声学品质的客观评价 .....                        | 180        |
| 9.3.1 音强 .....                               | 181        |
| 9.3.2 音长 .....                               | 183        |
| 9.3.3 动态范围 .....                             | 185        |
| 9.3.4 音色 .....                               | 187        |
| 9.4 钢琴声学品质的心理生理指标评价 .....                    | 192        |
| 9.4.1 心率变异分析 .....                           | 192        |
| 9.4.2 血压变异分析 .....                           | 198        |
| 9.4.3 皮肤温度变化分析 .....                         | 200        |
| 9.4.4 呼吸频率变化分析 .....                         | 201        |
| 9.5 本章小结 .....                               | 202        |
| <b>第10章 共鸣板振动参数与钢琴声学品质之间关系的综合分析</b> .....    | <b>205</b> |
| 10.1 共鸣板的振动参数与主观评价得分之间的关系 .....              | 205        |
| 10.1.1 共鸣板弹性模量与主观评价得分的相关性分析 .....            | 205        |
| 10.1.2 共鸣板纵波传播速度与主观评价得分的相关性分析 .....          | 206        |
| 10.1.3 共鸣板边部斜纹理试件弹性模量与主观评价得分的相关性<br>分析 ..... | 208        |
| 10.1.4 音板的振动响应时间与主观评价得分的相关性分析 .....          | 209        |
| 10.2 共鸣板的振动参数与客观评价指标之间的关系 .....              | 210        |
| 10.2.1 共鸣板弹性模量与客观评价指标的相关性分析 .....            | 210        |
| 10.2.2 纵波传播速度与客观评价指标的相关性分析 .....             | 212        |
| 10.2.3 共鸣板边部斜纹理试件弹性模量与客观评价指标的相关性分析<br>.....  | 213        |
| 10.2.4 音板的振动响应时间与客观评价指标的相关性分析 .....          | 216        |
| 10.3 本章小结 .....                              | 218        |

---

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| <b>第 11 章 共鸣板客观评价与共鸣板用材客观选取的总结分析 .....</b> | <b>220</b> |
| 11.1 钢琴共鸣板振动特性的客观评价.....                   | 220        |
| 11.1.1 共鸣板的弹性模量.....                       | 220        |
| 11.1.2 共鸣板的声传播速度.....                      | 220        |
| 11.2 钢琴音板用木材的客观选取.....                     | 221        |
| 11.3 本章小结.....                             | 222        |
| <b>第 12 章 结论 .....</b>                     | <b>223</b> |
| <b>参考文献.....</b>                           | <b>227</b> |

## 第0章 绪 论

### 0.1 木材声学的主要研究内容

声是一种机械扰动在气态、液态、固态物质中传播的现象。扰动是指在气态、液态、固态物质中的一个密度的，或者是压力的，或者是速度的某种微小变化，这个变化在弹性介质中就会被传播出去，这个传递的能量就是声。从声的这个概念上讲，只要在弹性介质中存在扰动，就会产生声波。声学是一门研究声波的产生、传播、接收以及与物质相互作用的科学。

目前整个声学研究的频率范围跨越  $10^{18}$  Hz，是物理学各分支里少有的。声学既有经典的物理性质，又有量子的性质，随着频率的升高，声学进入微观世界，不断发现新的现象和新的应用；随着频率的降低，低频声波的吸收衰减越来越小，穿透能力和传播距离大大增加，成为观察大气、海洋、地壳中许多现象的强有力的工具。

在声与物质相互作用的研究过程中，到目前为止，虽然主要是研究物质的声速、声衰减及密度、弹性系数（或黏度）等宏观量，但通过宏观量的测量，可以揭示物质微观世界的本质。如分子声学从超声传播速度和衰减及其弛豫效应的测定，可以研究气体中分子的各种运动之间的能量转移以及分子间的能量转移，与液体中的各种分子结构有关的动力学过程，以及固体物质的相变、缺陷、晶粒尺寸乃至微观的分子结构，半导体和超导体中的能隙及能级分布情况等。

木材和其他具有弹性的材料一样，在冲击性或周期性外力的作用下，能够产生声波或进行声波传播振动。木材声学主要是研究木材在外在的声波源作用下所产生的振动特性、传声特性、空间声学性质（吸收、反射、透射）等与声波有关的木材材料特性。声学技术在木材科学研究与技术领域得到了广泛的应用，从现有文献中可以看出，其应用主要体现在三个方面（图 0-1）。

#### 0.1.1 乐器共鸣板用木材的声学特性研究

声学性能好的木材具有优良的声共振性和振动频谱特性，能够在冲击力作用下，由本身的振动辐射声能，发出音色优美的乐音。更为重要的是，能够将弦振动的振幅扩大并美化其音色，向空间辐射声能。这种特性是木材能够广泛用于乐器共鸣部件制作的重要依据。

乐器共鸣板用木材的声学特性研究领域主要研究乐器共鸣板用木材的声振动特性、选取与改性等内容。

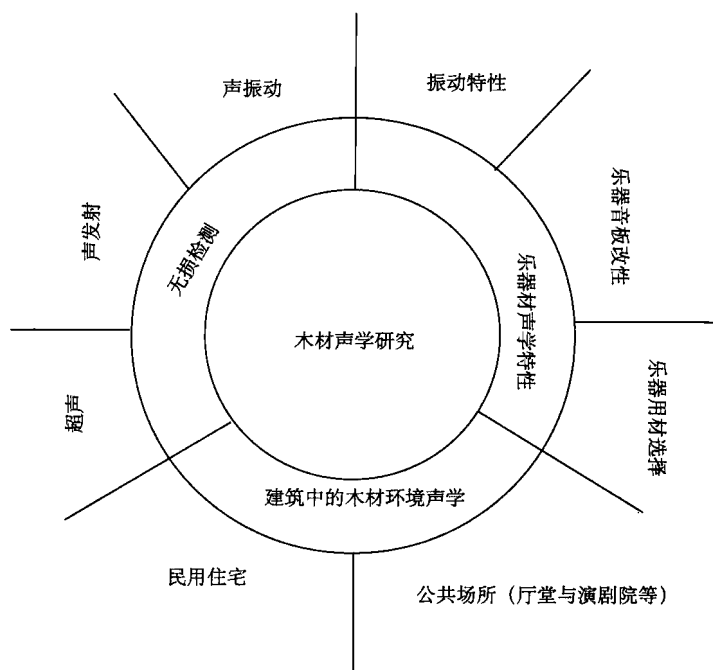


图 0-1 木材声学研究与应⽤范畴

乐器共鸣板用木材的选取：对用于制作乐器共鸣板的木材的要求极为苛刻，研究乐器共鸣板用木材的客观评价与科学选取对于提高乐器产品的质量具有重要的意义。

乐器共鸣板用木材的改性：从改善木材声振动性能及保持其声振动性能稳定性出发，研究乐器共鸣板用木材的改性方法及成效。

### 0.1.2 基于声学特性的木质材料无损检测研究

木材的声传播特性、声共振特性的物理参数,与木材的力学性质有着内在的联系,因此,可利用木材的声振动或机械波传递的测量,对其质量或力学性质进行无损检测。此外,用声共振波得到的木材动态黏弹性的参数指标,对化学处理材的品质评价和流变学模型解析起到不可缺少的作用。

基于声学特性的木质材料无损检测研究领域主要研究应用声学的方法（如超声波法、声发射法、声振动法等），实现对木质材料的力学性质、内部缺陷等的检测。

超声波法：主要是通过超声波在木材中的传播时间和传播速度不同来判别木材的内腐、边腐程度。

声发射法：在木材外部条件（受力、温度）改变时，利用木材内部迅速的能量释放，研究木材的力学性质。

声振动法：利用声波在木材中的传播速度和阻尼的变化来判断木材的力学性质及缺陷。

### 0.1.3 建筑中木质材料的声学特性研究

木材及木质材料制品对空气中的声波能量具有吸收、反射（扩散）和被透射的作用。在大中型民用建筑（如影院、音乐厅、礼堂等）及其他特殊建筑（如广播、电视、电影等技术用房）中，都广泛地运用木材的声学性质，将木材与其他建筑材料相配合，创造出具有良好空间音响学效果的室内环境。

建筑中的木质材料声学特性研究领域主要研究作为建筑用木材的空间声学特性及用木质材料装饰后的室内声学效果，具体包括木材的吸声性能、隔声性能及木质空间的混响。

木材的吸声性能研究：主要研究木质材料吸声性能的检测方法、吸声基本规律、影响因素及改进措施，以及具有特定吸声性能的新型木质材料产品的开发。

木材的隔声性能研究：主要研究木质材料隔声性能的检测方法，隔声的基本规律、影响因素及改进措施，以及应用于室内环境中具有特定隔声性能的新型木质材料产品的设计与开发。

木质空间的混响研究：主要研究在特定室内空间里，不同木质材料装饰与装饰方法、室内木质材料产品的摆放及木质材料的多少对室内空间混响的影响及内在的规律。

## 0.2 木材的声振动特性及性能评价

振动是木材传声与辐射声能的基础，因此，首先需要了解木材的振动。所谓的振动是指物体（或物体的一部分）沿直线或曲线，以一定的时间周期经过其平衡位置所做的往复运动。当一定强度的周期机械力或声波作用于木材时，木材会被激励而振动（受迫振动），其振幅的大小取决于作用力的大小和振动频率。在强度稳定而周期变化的外力作用下，在特定的频率下振幅能够急剧增大并达到最大振幅的现象称为共振。最大振幅对应的频率称为共振频率或固有频率。物体的固有频率由它的几何形状、形体尺寸、材料本身的特性（弹性模量、密度等）和振动的方式等综合决定。但是，在给定振动方式、几何形状和形体尺寸的情况下，则固有频率完全取决于材料本身的特性。木材受到瞬间的冲击力（如敲击）之后，也会按照其固有频率发生振动，并能够维持一定时间的振动。由于内部摩

擦的能量衰减作用,这种振动的振幅不断减小,直至振动能量全部衰减消失为止。这种振动称为衰减的自由振动或阻尼自由振动。

### 0.2.1 木材的基本振动方式

木材同其他固体材料一样,通常有三种基本振动方式,即纵向振动、横向振动(弯曲振动)和扭转振动(李坚,2002)。

#### 1. 纵向振动

纵向振动是振动单元(质点)的位移方向与由此位移产生的介质内应力方向相平行的振动,如图0-2(a)所示。运动中不包含介质的弯曲和扭转、波动成分,为纯纵波。叩击木材的一个端面时,木材内产生的振动和木棒的一个端面受到超声脉冲作用时木材内产生的振动都是纵向振动。纵向振动可以看做是在动力学情况下,静力学中压缩荷载作用于短柱的现象。

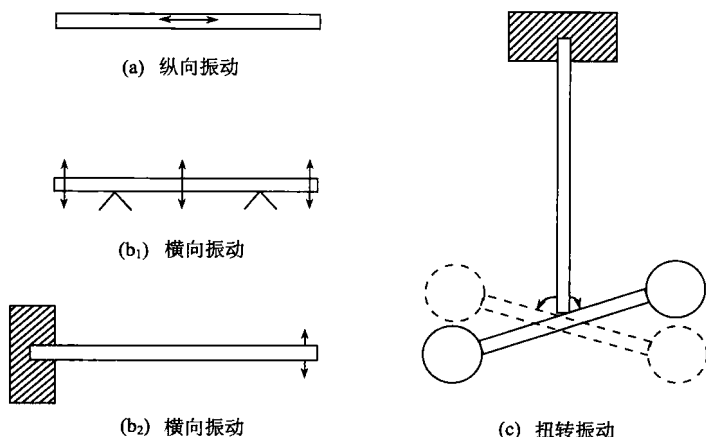


图 0-2 木材振动的基本类型

设木棒长度为  $L$ , 密度为  $\rho$ , 弹性模量为  $E$ , 则长度方向的声速  $v$  和共振频率  $f$  按式(0-1)、式(0-2)求得

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (0-1)$$

$$f = \frac{iv}{2L} = \frac{i}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (0-2)$$

式中:  $i$  为共振频率系数, 其值由共振频率阶次决定。

木材的纵向振动,除了在基本共振频率  $f_r$  (以下简称基频,  $i=1$ ) 发生共振之外,在  $f_r$  的整数倍频率处也发生共振,称高次谐振动或倍频谐振动。前5阶共振频率的系数  $i$  值及节点分布如表0-1所示。

表 0-1 木材杆纵向振动的前 5 阶共振频率及节点分布

| 共振阶数 ( $n$ ) | 共振频率系数 ( $i$ ) | 节点位置与杆长之比 ( $x/L$ )               |
|--------------|----------------|-----------------------------------|
| 1            | 1              | 0.500                             |
| 2            | 2              | 0.250, 0.750                      |
| 3            | 3              | 0.167, 0.500, 0.833               |
| 4            | 4              | 0.125, 0.375, 0.625, 0.875        |
| 5            | 5              | 0.100, 0.300, 0.500, 0.700, 0.900 |

## 2. 横向振动

横向振动是指振动元素位移方向和引起的应力方向互相垂直的运动。横向振动包括弯曲振动。通常在木结构和乐器上使用的木材，在工作时主要是横向弯曲振动，如钢琴的音板（振动时以弯曲振动为主，但属于复杂的板振动）、木横梁静态弯曲相对应的动态弯曲振动等。

木棒横向振动的共振频率通常比它的纵向共振频率低得多。横向共振频率不仅取决于木材试样的几何形状、尺寸和声速，且与木材的固定（或支撑）方式，即振动运动受到抑制的方式有关。矩形试件的共振频率  $f$ ，可由式（0-3）求得

$$f = \frac{\beta^2 h v}{4\sqrt{3}\pi^2} L^2 = \frac{\beta^2 h}{4\sqrt{3}\pi^2} L^2 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (0-3)$$

式中： $L$  为试件长度（m）； $h$  为试件厚度（m）； $v$  为试件的传声速度（长度方向）（ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）； $\beta$  为与试件边界条件有关的常数。

在木材试样处于两端自由的边界条件下，且在对应于基频振动节点处支撑（支点距两端点的距离均为试件长度的 0.224 倍位置）的情况下，如图 0-2（b<sub>1</sub>）所示，用式（0-3）计算基频时， $\beta$  应为 4.73。其 2 次、3 次直至  $n$  次谐频的  $\beta$  值，分别以  $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$  代表； $\beta_2 = 7.853$ ， $\beta_3 = 10.996$ ，当  $n > 3$  时， $\beta_n = (n+1/2)\pi$ 。应当注意的是，如果要测定基频以上的谐频，支点的距离也要做相应改变，移至各次谐振动节点所对应的位置，前 4 阶谐振动节点的具体位置如表 0-2 所示。

表 0-2 两端自由的杆作横向振动时的节点分布位置

| 共振阶数 ( $n$ ) | 常数 ( $\beta$ ) | 节点位置与杆长之比 ( $x/L$ )               |
|--------------|----------------|-----------------------------------|
| 1            | 4.730          | 0.224, 0.776                      |
| 2            | 7.853          | 0.132, 0.500, 0.868               |
| 3            | 10.996         | 0.094, 0.356, 0.644, 0.906        |
| 4            | $(n+1/2)\pi$   | 0.073, 0.277, 0.500, 0.723, 0.927 |



在木材试样一端固定而另一端自由的边界条件下（悬臂梁式），如图 0-2（b<sub>2</sub>）所示，在计算基频  $f_r$  时， $\beta=1.875$ ；计算谐频时， $\beta_2=4.694$ ， $\beta_3=7.855$ ，当  $n>3$  时， $\beta_n=(n-1/2)\pi$ 。

### 3. 扭转振动

扭转振动是振动元素的位移方向围绕试件长轴进行回转，如此往复周期性扭转的振动，如图 0-2（c）所示。在做扭转振动时，木材试件内抵抗这种扭转力矩的应力参数为刚性模量  $G$ ，或称为剪切弹性模量。如果木棒的惯性矩与外加质量的惯性矩相比可以忽略不计的话，则试件基本共振频率  $f_r$  取决于该外加质量的惯性矩  $I$ 、试件的尺寸和刚性模量  $G$ ， $f_r$  的计算如式（0-4）所示：

$$f_r = r^2 \sqrt{\frac{G}{8\pi IL}} \quad (0-4)$$

式中： $r$  为试件圆截面的半径； $L$  为试件的长度。

## 0.2.2 木材声振动性能的主要指标

乐器对其共鸣板用木材的声振动性能有极高的要求，木材声振动性能可从振动的声辐射性能以及振动能量的分配、消耗等方面体现，主要指标包括比动弹性模量、声辐射品质常数、木材的（内摩擦）对数衰减率（或损耗角正切）、声阻抗等。

### 1. 声辐射品质常数与比动弹性模量

在木材受瞬时冲击力产生横向振动，或者在受迫振动过程中突然中止外部激励力的情况下，观察木材的振动随时间的变化，可以看出，木材的振动能量逐渐减小，振幅逐渐降低，直至能量全部消失，恢复到静止状态。产生这种现象的原因是试件所获得的能量在振动过程中被消耗而衰减。木材的振动能量衰减由两部分组成：一部分相当于在向空气中辐射能量时为克服空气阻力所消耗的能量，这部分能量以声波的形式辐射到空气中，由此产生的衰减为声辐射衰减；另一部分是由于在木材内及周围的接触固定界面上的能量吸收，即由内部分子间的摩擦和界面上的摩擦，将动能转变为热能而被消耗，这种能量衰减称为内摩擦衰减或损耗衰减。从上述分析来看，木材振动所消耗的能量是用于声能辐射的能量分量和消耗于内摩擦的能量分量的组合。消耗于内摩擦等热损耗因素的能量越小，用于声辐射的能量越大，则声振动的能量转换效率就越高。

木材及其制品的声辐射能力，即向周围空气辐射声功率的大小，与传声速度成正比，与密度  $\rho$  成反比，用声辐射阻尼系数  $R$  来表示，如式（0-5）所示：

$$R = \frac{v}{\rho} = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \quad (0-5)$$

声辐射品质常数又称声辐射阻尼系数，这是因为人们常常用它来评价材料声辐射品质的好坏。木材用做乐器的共鸣板时，应尽量选用声辐射品质常数较高的