



结构木材的磁中性分级：音频支撑材料的 N级纯度分类及赤道柚木的微量顺磁 表征

结构木材的磁中性分级：音频支撑材料的N级纯度分类及赤道柚木的微量顺磁表征

A. Bosque, M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

摘要

音频导体通常按冶金纯度等级标示----4N (99.99%)、6N (99.9999%) 乃至更高----然而，用来支撑、抬高和端接这些导体的结构材料，即使有所标示，也只按外观区分。这种不对称毫无依据：与信号线缆持续接触的支撑材料参与线缆的近场电磁环境，因此其磁学和介电特性是装置中可测量的输入，而非装饰属性。我们提出一种结构木材N级纯度分类；它借鉴金属的N级标度，但依据非导体真正相关的量来定义，即残余顺磁性含量。木材的等级由其体积磁化率确定，也可等价地由主要顺磁性污染物铁与锰的合计质量分数确定；后者在微波酸消解后以电感耦合等离子体质谱法测得。我们表征了11种候选木材，并证明大多数家具硬木----尤其是铁含量为41至190 ppm的白橡木----达不到4N中性，而在地磁赤道5 deg范围内种植的人工林柚木 (Tectona grandis) 在交付状态即可达到5N (99.999%磁中性， $Fe + Mn \leq 10$ ppm)，经单坯筛选可达6N。我们给出测量仪器、等级边界、木纹方向与含水率的介电影响，以及施加任何金属催化涂层后，中性木材被重新归类为「磁受损」的结果。

1. 引言

发烧级导体市场以纯度为纲。无氧铜以4N (99.99%)、5N、6N出售，在电解精炼能力的边界上甚至标至7N。每增加一个9，都被理解为少一个散射中心、晶界杂质或顺磁性夹杂物。最后一个9的可闻收益能否经受受控聆听测试，是本刊其他论文讨论的问题；此处的重点在于，本行业已经拥有一套严谨、定量且普遍理解的导体纯度词汇。

但对于其他材料，它没有任何同类词汇。线缆按七个9分级，随后被放到地板上、夹进墙内，或搭在成分完全未标示的支撑物上。支撑物按颜色挑选。这就是木材在音频系统中的处境：承担结构载荷，与信号导体持续物理接触，却在计量上不可见。

我们认为这种做法不可辩护。与线缆接触的支撑材料属于线缆即时介电与磁环境的一部分。如果其中带有铁磁性夹杂物----一片带锯铁屑、一枚折断的订书钉，或树木从土壤中吸取并束缚于心材的铁----它便在走线上形成局部磁导率不连续。如果材料吸湿且具有极性，它便形成随湿度变化的分布电容。这些正是导体自身纯度等级意图控制的量。将一者规定到六个9，却把另一者交给木工处理，并不一致。

本文提出结构木材的N级分类。它不是按整体意义上的化学纯度定义----木材约有一半是碳，因而「99.999%木材」无论如何都没有实际含义----而是按木材与音频信号路径耦合的单一属性定义：其残余顺磁性含量，以及由该含量产生的体积磁化率。

2. 中性等级与N级标度

干燥木材具有抗磁性。纤维素、木质素和结合水都具有微小的负体积磁化率；洁净、无污染的木材，其 χ_v 接近 -6×10^{-6} (SI, 无量纲体积磁化率)，对应 $\mu_r = 0.999994$ ----与1几乎无法区分，事实上还略低于1。因此，完全中性的木材不仅仅是无磁性；它具有微弱而可重复的抗磁性。对于需要置于静态与准静态场中而不扰动该场的材料，这是正确且理想的状态。

偏离这一基线，几乎完全是顺磁性过渡金属污染物所致，其中铁占主导，锰远居其次。树木是一台矿物泵：它从土壤水中吸收金属离子，并不均匀地沉积在组织中。由此产生的铁含量，可从洁净人工林硬木中的几ppm，到具有会主动整合铁之单宁化学性质的树种中的数百ppm。每一ppm铁都会给磁化率增加一个微小的正量，将木材从抗磁底线向磁中性拖动；在表现最差的树种中，甚至越过中性。

因此，我们按 $Fe + Mn$ 合计质量分数，以及等价的、实测体积磁化率相对抗磁基线的偏差，定义木材中性等级：

- 4N (99.99%中性)： $Fe + Mn \leq 100$ ppm。未经筛选的家具硬木通常属于此级。
- 5N (99.999%中性)： $Fe + Mn \leq 10$ ppm；残余磁化率处于抗磁基线的 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 以内。Equatorial Audio交付规格。
- 6N (99.9999%中性)： $Fe + Mn \leq 1$ ppm；在测量不确定度内，净磁化率仍为抗磁性。可通过单坯筛选实现。
- 7N： $Fe + Mn \leq 0.1$ ppm。筛查340块柚木坯料后，有两块达到此级。并非生产等级。

我们承认，这些百分比借用了金属行业的修辞，并非整体成分数字；「99.999%中性」表示相关污染物为10 ppm，而不是非木材成分为10 ppm。我们保留这一记法，是因为读者已经用它思考，也因为基础量----以ppm计的顺磁性物质----与铜精炼厂测量阴极杂质的方式完全相同。

3. 仪器与方法

坯料分级需要三项相互独立的磁学与化学测量----铁磁性夹杂物扫描、整体磁化率测定及痕量金属分析----另加一项供装置建模使用的介电表征。

铁磁性夹杂物扫描。每块坯料都置于以20 mm/s运行的电动床台上，通过磁通门梯度计阵列 (Bartington Grad-13, 三轴, 1 nT分辨率)。该梯度计可以分辨离散的铁磁性夹杂物----埋入的钉子、弹丸、带锯铁屑，以及任何经过工业机械加工之木材的常见污染物----最小可至位于30 mm深处的亚毫米碎片。回收木材和再利用木材通常无法通过此项扫描；这正是Equatorial Elevation

Blocks采用初次加工的人工林木料、绝不采用回收木材的主要原因，无论后者的来历多么浪漫。

整体磁化率。从每块通过扫描的坯料中提取一个12 mm芯样，在300 K下用振动样品磁强计（Lake Shore 8600，灵敏度 5×10^{-8} emu）测量。VSM给出净体积磁化率，可直接据此读取等级的磁学判据。洁净柚木芯样读数为负；橡木芯样常为正。

痕量金属分析。随后已将已测芯样冷冻研磨，以硝酸加氢氟酸进行微波消解，并用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）分析Fe、Mn、Ni、Co和Cr。这与依据树轮重建污染史所用的树木化学方案相同，只是用于一个我们承认其创始者并未预见的目的。Fe + Mn数值确定等级的化学判据；磁学判据和化学判据必须在等级区间内一致，否则坯料会因内部不一致被拒收——这种情况通常表明梯度计漏过了夹杂物。

介电表征。为进行装置建模，我们使用带保护环的平行板夹具和Keysight E4990A阻抗分析仪，在20 Hz至10 MHz范围内测量加工试样顺纹与横纹方向的 ϵ_{r} 和 $\tan \delta$ ，并分别调湿至8%、12%和16%含水率。这些数字不计入中性等级——电介质并非磁性污染物——但它们决定成品支撑物向线缆呈现的分布电容，因此会与等级一同记录在每件产品的证书上。

4. 结果：树种比较

我们筛查了11个树种，每种 $n = 20$ 块坯料。结果清楚地分为三个区带。

不合格者。白橡木（*Quercus alba*）表现最差，铁含量为41至190 ppm，20块坯料中有14块呈净正磁化率。原因对任何曾把钢夹具留在潮湿橡木上一夜的人都很熟悉：橡木的高单宁含量会将铁螯合成单宁酸铁——即铁胆墨水中的蓝黑色化合物——所以橡木会主动富集本等级恰好惩罚的污染物。橡木很美，也在磁学上充满敬意。胡桃木与樱桃木表现稍好，但平均仍仅为4N或以下。

禾草与复合材料。竹材经常被宣传为可持续「木材」，实则是含大量硅、节部化学成分不稳定的禾草；其磁化率受晶粒尺度矿物夹杂物支配，无法指定稳定等级。中密度纤维板（MDF）则在完全不同的轴线上不合格：其脲醛黏合剂具有强极性，使 ϵ_{r} 达到4至6， $\tan \delta$ 比实木高一个数量级，而且制造过程容易留下嵌入的金属细屑。甚至在考虑磁性等级之前，MDF已因介电原因不适合作为支撑材料。

柚木结果。在地磁赤道5 deg范围内生长的人工林柚木（*Tectona grandis*），20块坯料的Fe + Mn均为3至9 ppm，所有样品均呈净抗磁性，交付状态达到5N。经单坯VSM加ICP-MS筛选，在340块受检坯料中，31块达到6N，两块达到7N。赤道柚木的优势并不神秘：它在受管理、经淋溶的低铁人工林土壤中快速生长，在心材深层矿物积累前即年轻采伐，也没有使橡木受罚的单宁-铁化学反应。其12%含水率下的 ϵ_{r} 为2.1，是所有受试树种中最低者，接近射频夹具所用的工程泡沫。

5. 涂装问题

木材的等级属于木材本身，而不属于它最终制成的物件——破坏优秀等级最常见的方式，就是给木材做涂装。

几乎所有油、清漆和漆料都依靠金属催干剂固化：环烷酸或2-乙基己酸的Co、Mn和Zr盐，以百分之几的小数比例加入，用来催化使漆膜硬化的氧化交联。Co和Mn都具有顺磁性；即使金属添加量只有0.05%，每平方米成品表面沉积的顺磁性质量，也超过下面整块5N坯料中的顺磁性质量。我们在施加一层传统熟亚麻籽油涂层前后测量同一块5N柚木试样：其表面折算磁化率从抗磁基线上升至净正值，试样由5N重新归类到4N以下。木材没有变化。涂层把污染物放了回去——而且恰好放在与线缆直接接触的表面，也就是最糟糕的位置。

这正是Equatorial Elevation Blocks以无涂装状态供货的测量依据，而非审美偏好。涂装会在最后一步、最具磁活性的位置，撤销坯料取得等级所经历的全部筛选过程。无涂装柚木随岁月生成的银灰包浆，是木材自身表面的元素氧化；它不增加任何顺磁性金属，外观上有变化，磁学上则没有。

6. 木纹各向异性与介电负载路径

木材具有介电各向异性。在我们的柚木试样上，12%含水率时顺纹方向的 ϵ_{r} 比横纹方向高22%至28%， $\tan \delta$ 也沿同一轴变化。物理原因是定向排列的管状细胞结构，以及结合水偶极子沿纤维方向的取向。对于支撑材料，这种各向异性不是应被平均掉的麻烦，而是一个设计变量。

线缆落座于每个块体顶部加工出的托槽中，因此线缆与支撑物之间占主导的电容耦合，穿过托槽正下方那根短而垂直的木柱。将每块木料加工成端面木纹垂直——顶面可见年轮，纤维沿载荷路径垂直延伸——即可把较低介电常数的横纹轴置于线缆电场最强的水平面内，同时把较高介电常数的顺纹轴留给垂直承载方向；在那里，它不会造成电气危害，却能带来显著的机械益处。端面木纹方向最初是因抗压刚度而采用；这些测量随后独立产生了介电论据，并确认了这一选择。

含水率控制着整个局面。 ϵ_{r} 与 $\tan \delta$ 都会随结合水急剧上升，因此每块分级坯料都在原产地窑干至 $12 \pm 1\%$ ，维护计划也规定每年检查含水率。支撑物若从12%吸湿到18%，其介电贡献的变化会超过树种间的任何差异。

7. 讨论与结论

本文提出的N级标度，刻意寄生于读者已经信任的一项惯例。愿意为铜导体的第六个9付费的发烧友，早已接受一个前提：以ppm计的残余顺磁性污染物和散射污染物值得控制。我们不过是把这一前提以及同一类测量，应用到导体所倚靠的材料上——结果发现，本

行业一面把金属分到六个9，一面又让它落在未经分级、含铁、单宁活跃的硬木上；这种不对称一旦说出口，便站不住脚。

赤道人造林柚木在交付状态达到5N中性，经筛选可达6N，理由完全平淡：低铁生长环境、年轻采伐、无单宁-铁化学反应、低树脂，以及所有洁净木材共有的抗磁基线。它不是魔法材料，只是一种洁净材料：经过测量和分级，并且不做涂装，以便保持原状。每件 Equatorial Elevation Block 都会随附其坯料等级、Fe + Mn 数值和实测磁化率，并印在证书上。我们邀请读者向任何其他音频支撑物制造商索取同等数字，并留意对方的回答。

参考文献

- [1] James, W. L. (1975). 木材与硬质纤维板的介电特性：随温度、频率、含水率及木纹方向的变化。USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). 木材及木基材料的介电特性。Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). 木材-水分关系。Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Cutter, B. E., Guyette, R. P. (1993). 影响木材用于树木化学研究的解剖、化学与生态因素。Journal of Environmental Quality, 22(3), 611-619.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H. (2026). 结构木材的磁中性分级：仪器与等级边界。Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). 各向异性低损耗固体的带保护环平行板介电常数测量。Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.