



介电各向异性与端面木纹的依据：磁中性木制线缆支撑物中电容负载路径的取向



介电各向异性与端面木纹的依据：磁中性木制线缆支撑物中电容负载路径的取向

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

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

摘要

木制线缆支撑物是一个置于信号导体近场内的电介质，因此它对装置的贡献，是一个与线缆并联、具有分布性且取决于取向的电容。在木材中性分级的旗舰研究（Bosque、Ferro、Park与Tanaka，2026）中，木纹方向被认定为设计变量，并依据一节中简述的机械与介电综合论证，采用端面木纹垂直铣削。本文完整展开这项论证。木材具有介电各向异性：顺纹方向的 ϵ_{r} 和 $\tan \delta$ 都高于横纹方向；顺纹轴又高于两条横向轴，因为管状管胞与导管细胞的几何形状，以及主导极化的结合水偶极子，均沿纤维排列。我们报告赤道柚木沿三个解剖轴（纵向L、径向R、弦向T），在8%、12%和16%含水率、20 Hz至10 MHz范围内，以带保护环平行板阻抗分析仪测得的 ϵ_{r} 与 $\tan \delta$ ；结果确认在音频频率与12%含水率下， $\epsilon_{\text{r,L}} / \epsilon_{\text{r,T}}$ 各向异性比为1.24至1.31。依据这些常数，我们建立一个分布电容模型：线缆落座于木柱上方加工的托槽内；随后计算端面木纹垂直与板面木纹铣削时，每块支撑物贡献的电容。两种取向存在可测差距。端面木纹的线缆折算电容更低，因为它把低介电常数的横向轴置于线缆电场最强的水平面，并把高介电常数纵向轴留给垂直载荷路径；在那里，后者在电气上无害，在机械上理想。木纹角度扫描把耦合最小值定位于真正的端面木纹。最后我们指出，最初规定端面木纹是为了抗压刚度，而之后独立得到的介电论据与机械论据一致，恰好对其作出确认。

1. 引言

线缆支撑物不传输信号，它只是坐在信号旁边。这正是它的电气角色容易被忽视的原因：线缆下方的一块木头显然不在电路内，因此很容易断定其成分、木纹和取向属于木工而非工程师的事务。关于中性分级的旗舰论文（Bosque、Ferro、Park与Tanaka，2026）论证了问题的磁学一半——与导体持续接触的支撑物属于导体近场环境的一部分，其残余顺磁性含量是装置中可测量的输入，而非装饰属性。介电一半只用一节便处理完毕。本文把那一节扩展到其物理学应得的篇幅。

块体位于线缆旁边而非其中，这项电气事实并未把它从电路中移除；它只是确定了耦合方式。导体电场中的电介质会以电容方式储能，而与传输线并联的分布电容就是负载——虽小，却真实存在；其量值取决于物体的 ϵ_{r} ，以及 ϵ_{r} 相对电场的取向。木材不是各向同性电介质。其 ϵ_{r} 随方向变化，因此木制支撑物不是只有一种介电贡献，而是有三种；在铣床旁，可通过切割坯料的角度加以选择。

本文的论断范围有限且可以量化。我们认为，Equatorial Elevation Block所规定的端面木纹垂直方向——顶面可见年轮，纤维沿载荷路径垂直向下——可以使块体的线缆折算电容最小；该最小值可测而非概念假设，并且与已经按机械理由选定的方向重合。我们并未声称效应很大，只声称它具有符号、量值和优选方向；制造商若为了更漂亮的板面木纹反向加工块体，就在根本不知道这个数字存在的情况下，把它推向了错误方向。

2. 木材的介电各向异性

木材是一种细胞固体，由细长、中空且沿轴向排列的细胞构成——软木中的管胞，以及柚木等硬木中的纤维与导管——细胞长轴定义木纹。每位木工都熟悉的机械各向异性源于这种几何结构；不那么广为人知、却同样真实且早有记录的介电各向异性也源于此（James，1975；Torgovnikov，1993）。

三种机制使 ϵ_{r} 依赖方向，而且都偏向纵向轴。第一，细胞壁沿纤维形成连续的可极化路径，横跨纤维时则会中断，因此大量细胞壁-细胞腔交界处的界面（Maxwell-Wagner）极化优先沿木纹累积。第二，保存在细胞壁中的结合水——除最干燥状态外，是木材 ϵ_{r} 的主要贡献者——所处环境中的羟基位点与微纤维支架本身也沿纤维排列，因此结合水偶极子的取向极化顺纹时比横纹时更容易。第三，两条横向轴即径向R与弦向T之间只有微小差异，二者都远低于纵向L。文献中的结果一贯为 $\epsilon_{\text{r,L}} > \epsilon_{\text{r,R}} \sim \epsilon_{\text{r,T}}$ ， $\tan \delta$ 也遵循同样次序；在吸湿范围内，温带与热带硬木的 $\epsilon_{\text{r,L}} / \epsilon_{\text{r,T}}$ 通常为1.2至1.5。

绝对值不高，且由水分主导。绝干木材的 ϵ_{r} 约为2至3；随着含水率上升，该值陡峭而单调地增加，因为每增加一份结合水，就会向可极化物质总量中增加偶极子。正因这种陡峭关系，在支撑物的介电贡献上，含水率而非树种才是最大的杠杆；第5节将对此加以讨论。对于各向异性论证，核心在结构而非数字：最高 ϵ_{r} 的方向就是纤维方向，而这一方向由木工决定，不由树木决定。

3. 测量：三个轴向的介电常数与损耗

我们在沿三个解剖轴分别加工的柚木试样上测量 ϵ_{r} 和 $\tan \delta$ ，使平行板夹具施加的电场依次沿纵向、径向与弦向穿过样品。试样为40 mm见方、3.0 mm厚，两面加工平整且平行，误差控制在 ± 10 微米；材料取自按旗舰方案筛选的三块5N赤道坯料，以免磁性污染干扰介电读数。每组试样都在恒湿箱内分别调湿至8%、12%和16%含水率的平衡状态，并在测量结束时相对绝干质量，以重量法核实含水率。

夹具为先前所述类型（Tanaka与Park，2022）的带保护环平行板装置，由Keysight E4990A阻抗分析仪在20 Hz至10 MHz范围内驱动。保护环抑制边缘场，使实测电容对应确定的电极面积，提取的 ϵ_{r} 为材料整体值，而非受边缘污染的估计； $\tan \delta$ 则直接读取为夹具耗散因数。接触面使用薄导电弹性体夹层，以适应加工面的残余粗糙度，同时避免使用会贡献自身极化的黏合剂。

在12%含水率与1 kHz下，柚木测得 $\epsilon_{sL}=2.64$ 、 $\epsilon_{sR}=2.09$ 、 $\epsilon_{sT}=2.02$ ； $\epsilon_{sL}/\epsilon_{sT}$ 为1.31， $\epsilon_{sL}/\epsilon_{sR}$ 为1.26；两条横向轴如预期在4%以内一致。 $\tan \delta$ 遵循同样次序：顺纹为0.021，横纹为0.014至0.015。在20 Hz至20 kHz音频带内， ϵ_{sR} 变化不超过3%，各向异性比保持在1.24至1.31。含水率升至16%会抬高全部数值—— ϵ_{sL} 达到3.08——并且值得注意地略微扩大各向异性，因为新增结合水优先沿优势轴极化。干燥到8%则同时压缩绝对值与比值。因此，各向异性并非固定的材料常数，而是受水分调制；在最无关紧要的湿润状态最强，在材料最干时最弱；在12 +/- 1%的交付规格下则清晰可分辨而且稳定。

4. 托槽、线缆与木柱的分布电容模型

要把三个 ϵ_{sR} 转化为设计决策，我们需要耦合几何。线缆不是放在平坦块体上，而是落座于托槽中；托槽是在顶面加工出的浅圆弧凹槽，因此线缆护套的一段有限弧面与木材之间只隔着护套壁厚。该弧面正下方的木材——从托槽底部垂直向下进入块体的一根短柱——是导体与任何远端接地回路之间电场最强之处，也是绝大部分线缆-支撑物电容储存的位置。更远、更靠外和更靠下的木材，随着电场扩散衰减，其贡献权重迅速下降。

我们把它建模为每单位走线长度的分布电容：将木材的 ϵ_{sR} 张量逐轴代入，对托槽下方及周围木材体积中的局部场能积分。各向异性电介质的处理方式是标准的：垂直电场分量取样垂直轴 ϵ_{sR} ，水平分量取样水平轴 ϵ_{sR} ；由于托槽把电场集中到导体正下方近乎垂直的区域，而闭合电容的回流路径则穿过木柱侧翼向外、向下延伸，水平 ϵ_{sR} 承担更大比例的储能。模型输出的是单个工程关注量： ϵ_{sR} 张量按不同方式取向时，每块支撑物为线缆增加多少电容，以pF计。

实际有意义的是两种取向。端面木纹垂直铣削使纵向轴L沿载荷路径垂直向下，两条低 ϵ_{sR} 横向轴R和T则留在水平面。板面木纹（平锯，纤维水平）铣削把纵向轴L放入水平面，由强水平电场分量取样，同时使一条横向轴竖立。将12%含水率的实测常数输入代表性托槽几何（线缆直径12 mm、圆弧托槽3 mm、块体高度60 mm、接地回路标称距离为机箱距离），端面木纹方向每块约1.9 pF，板面木纹方向每块约2.3 pF——差约0.4 pF，即约18%，仅由切割角度产生。对单块而言数值很小。但它真实、可重复、符号单一，而且免费：制造商只需决定正确放置坯料，无需承担其他成本；在完整走线所用的若干块支撑物上，它还会累积。

5. 木纹角度扫描与水分敏感性

上述两种命名取向是连续区间的两个端点，因此值得确认端面木纹是真正的小值，而不只是两个任意选择中较好的一种。我们以相对载荷轴0 deg（纤维垂直，真正端面木纹）、30 deg、45 deg、60 deg直到90 deg（纤维水平，板面木纹）的木纹角度加工一系列试样，并在托槽模型几何中、导体通电极于其上方时逐一测量。线缆折算电容随木纹角度单调上升，从0 deg的端面木纹最小值升至90

deg的板面木纹最大值；随着高 ϵ_{sR} 纵向轴逐渐旋入水平电场，其变化紧密遵循张量模型预测的余弦平方加权。曲线在0 deg附近平缓——几deg的加工误差几乎没有代价——而在扫描中段最陡，因此真正草率切割的惩罚远大于用心但不完美的切割。最小值位于真正端面木纹，而且是最小值，不是拐点。

含水率会垂直移动整条曲线，却不改变最小值的位置。由于 ϵ_{sR} 随结合水急剧增加，从12%漂移到16%含水率的块体，其绝对电容增加量比固定含水率下端面木纹到板面木纹的全部差值还大——水分杠杆大于取向杠杆。但二者彼此独立：木材吸湿会抬高下限，却不改变哪种取向最低。因此，取向与调湿是互补控制，两者都必须执行。这正是每块分级坯料在原产地窑干至12 +/- 1%，并在维护计划中每年检查水分的实测依据：加工方向被永久铣入，不会漂移；缩放其影响的水分却会变化，一件留在潮湿房间中达到平衡的支撑物，会慢慢交还加工台为它争取的余量。

顺带指出，第3节测得的两条横向轴一致性，意味着在测量不确定度内，径向或弦向位于水平面并无差别；只要纤维保持垂直，块体可以绕垂直轴旋转定向，以取得最佳顶面年轮外观，不会产生介电后果。

6. 讨论：两项论据，一种取向

采用端面木纹方向，并不是为了介电表现，而是因为这是木材承受压缩载荷时刚度和强度最高的方式：纤维垂直站立时，向下的载荷沿管状细胞最强的方向传递，块体抵抗线缆走线静重及装置沉降时，蠕变与尺寸变化最小。这是一条古老而毫无争议的木材工程知识，在测量任何 ϵ_{sR} 之前，便已决定加工规格。

本文所报告的介电测量在此之后进行，原则上完全可能与机械选择相冲突——顺纹轴本可能是低 ϵ_{sR} 轴；如此一来，将其竖直会在机械上正确、在电气上错误，迫使我们折中。结果没有冲突。顺纹轴是高 ϵ_{sR} 轴，因此将它竖直，就会把它移出线缆电场最强的水平面；这正是电容模型所要求的。机械上理想的取向，也独立地成为介电上最安静的取向。两项论证来自不同的物理学，由解决不同问题的人在相同时间建立，却选择了同一种切法。

我们不为这种一致附加任何神秘意义；各向异性材料的刚性轴与高 ϵ_{sR} 轴经常对齐，因为两项属性都可追溯到同一种定向微结构，柚木正是如此。不过，实际后果仍然成立。只遵循机械论据的制造商会选择端面木纹，并在无意间同时把电容耦合降到最低。为了装饰性板面木纹而推翻机械论据的制造商，则会在两方面同时受损。这种汇合与其说是值得惊叹的巧合，不如说是信任规格的理由：两条独立推理路线若终结于同一个数字，该数字更可能正确。

7. 结论

木材是一种介电各向异性物体，而木制线缆支撑物就是置于导体近场中的该物体。它对装置的贡献是一项很小的分布电容；制造商无论是否知情，都会在铣床旁决定其量值。我们测量了赤道柚木的三轴 ϵ_{sR} 与 $\tan \delta$ ，确认在交付含水率下存在预期次序 $\epsilon_{sL} >$



$\epsilon_{\text{R}} \sim \epsilon_{\text{T}}$ ，各向异性比接近1.3；随后将这些常数带入托槽与木柱电容模型，得到每块支撑物的pF指标。端面木纹与板面木纹加工之间存在可测差异。在代表性几何中，端面木纹较低，约低0.4 pF和18%；木纹角度扫描确认它是真正的最小值。

每块的余量很小，我们拒绝夸大。我们只主张该余量真实存在，具有优选方向，而且优选方向与已经按机械理由规定的方向相同。Equatorial Elevation Block采用端面木纹垂直铣削，是因为端面木纹承受压缩载荷时刚度最高；之后进行的本文介电分析则确认，同一种切法在介电上也最安静。每块产品都以端面木纹朝上、窑干至12 +/- 1%、无涂装状态出货，证书载明其等级与实测常数。我们邀请读者询问任何其他木制支撑物制造商：他们的木纹朝哪个方向，以及为什么。

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] Norimoto, M. (1976). 木材的介电特性。Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). 结构木材的磁中性分级：音频支撑材料的N级纯度分类。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.