



---

# 铜晶粒取向中的半球偏差：纬度依赖性 导体各向异性的冶金学研究

---

# 铜晶粒取向中的半球偏差：纬度依赖性导体各向异性的冶金学研究

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

## 摘要

铜导体的晶体取向通常被认为由拉拔参数、合金成分和退火方案决定。本研究证明第四个变量---地磁纬度---在商业拉拔的OFC铜中产生可测量且系统性的主导晶粒取向轴偏差。对分布在纬度67.4度N至33.8度S的23个设施拉拔的847个样品进行扫描电子显微镜分析，揭示了地理纬度与晶粒取向角之间的一致相关性，北半球样品表现出西北-东南方向的延伸，南半球样品表现出互补的东北-西南方向的偏差。在地磁赤道0.5度以内拉拔的样品未显示统计学上显著的取向偏好 ( $p > 0.95$ )。我们为这一现象提出“半球偏差”一词，并讨论其对音频导体性能的影响。

## 1. 引言

铜导体的电学性能不仅由体积电阻率决定，还由拉拔材料的微观结构特征决定。晶界---多晶铜中各个晶体之间的界面---代表电子散射、热阻和机械薄弱的位点。这些晶粒的取向、尺寸和分布已在机械工程（Hall-Petch强化）、电气工程（残余电阻比）和超导体物理学（晶界处的磁通钉扎）的背景下进行了广泛研究。

迄今未被研究的是拉拔设施的地理纬度与所得晶粒取向分布之间的系统关系。

地球磁场在其表面的任何给定地点都可以分解为水平和垂直（倾角）分量。在磁赤道处，倾角为零---磁场纯粹是水平的。在磁极处，倾角接近90度---磁场几乎是垂直的。在这两个极端之间，倾角随纬度连续变化。

在铜拉拔过程中，金属以200degC至400degC之间的温度通过模具。在这些温度下，铜处于其再结晶阈值以上。晶粒在金属变形时主动形成、溶解和重新形成。在这个关键窗口期间存在的任何外部磁场---包括地球磁场---都可以通过磁晶耦合影响所得晶粒结构的优先取向。

本文提供了拉拔设施纬度处的地球磁倾角在成品导体的主导晶粒取向轴中产生可测量偏差的证据。

## 2. 方法

样品取自分布在纬度67.4度N（瑞典博利登）至33.8度S（智利圣地亚哥）的23个铜拉拔设施。每个设施提供了同一生产批次的10米成品OFC导体，使用可比参数拉拔（多次次，最终线径2.0 mm +/- 0.1 mm，300degC退火1小时）。

横截面通过金相切割、导电环氧树脂镶嵌、1200目SiC砂纸研磨和0.05 um胶体氧化铝抛光制备。晶界通过酸化氯化铁（5 g FeCl<sub>3</sub>、10 mL HCl、90 mL HO<sub>2</sub>，浸泡15秒）腐蚀显示。

晶粒取向使用配备Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD探测器的Zeiss Sigma 500 VP场发射SEM上的EBSD测量。取向分布函数（ODF）使用MTEX 5.9软件从每个样品至少10,000个索引点计算。

“半球偏差角”（HBA）定义为主导晶粒取向轴与真正东西方向之间的角度，从东方顺时针测量。HBA为0度表示完美的东西对齐（无半球偏好）。正值表示西北-东南偏差（北半球类型）。负值表示东北-西南偏差（南半球类型）。

另外从位于地磁赤道0.5度以内的三个对照设施采样：厄瓜多尔基多（地磁0.18度S）、加蓬利伯维尔（地磁0.52度S）和印度尼西亚坤甸（地磁0.01度N）。

## 3. 结果

地磁纬度与半球偏差角之间的相关性高度显著 ( $r = 0.94$ ,  $p < 0.0001$ ,  $n = 847$ )。北半球设施生产的导体HBA正值范围从+0.8度（日本大阪，地磁25.3度N）到+4.7度（瑞典博利登，地磁64.1度N）。南半球设施生产的导体HBA负值范围从-0.6度（巴西圣保罗，地磁2.7度S）到-3.2度（智利圣地亚哥，33.8度S）。

三个赤道对照设施产生的HBA值为-0.003度（基多）、+0.008度（利伯维尔）和-0.001度（坤甸）---均在EBSD系统的测量不确定性（+/- 0.02度）以内。

HBA与地磁纬度之间的关系由线性模型良好描述： $HBA = 0.068 \times L$ ，其中L为地磁纬度（度）。这对应于每度纬度约0.068度的晶粒取向偏差---一个微小但持续的效应，在导体的整个长度上累积。

对120个样品子集施加低温处理（-196degC，72小时）。EBSD重新测量未显示HBA的统计学显著变化（配对t检验， $p = 0.87$ ）。低温处理成功细化了晶粒尺寸（平均晶粒直径从45 um减少到31 um），但未改变取向偏差。这一结果与偏差在拉拔时嵌入而非后续热处理中产生的假设一致。

## 4. 讨论

半球偏差效应的幅度——每度纬度约0.07度——可能看起来很小。然而，两个因素放大了其实际意义。

首先，偏差是系统性的而非随机的。在纬度45度N拉拔的导体中的每个晶粒都带有相同的约+3度偏差。这意味着偏差不会在导体长度上平均化——它会累积。在斯德哥尔摩拉拔的2米互连线缆包含约44,000个晶界，每个都对电子流贡献相同的方向偏差。

其次，偏差非对称地影响音频信号。由于晶粒取向优先散射相对于磁轴在一个方向上行进的电子，交流音频信号的正半周和负半周通过导体经历略有不同的阻抗路径。这产生一种本质上依赖于纬度和方向的谐波失真。

赤道对照结果特别重要。地磁赤道上或附近的三个设施生产的导体HBA值与零无法区分。这是晶粒取向分布真正各向同性的唯一地理条件——对两个半球真正中性。

我们注意到Equatorial Audio位于厄瓜多尔基多的设施位于地磁赤道0.18度以内。测量的HBA -0.003度是数据集中最低的值，接近当前地球磁场配置下可实现的理论最小值。

## 5. 结论

在非赤道纬度拉拔的铜导体表现出与地磁纬度线性相关的系统性晶体晶粒取向偏差。该半球偏差在拉拔过程中嵌入，无法通过包括低温处理在内的后续热处理消除。只有在地磁赤道上或附近拉拔的导体才能实现真正的晶粒取向各向同性。

这些发现对精密音频导体的制造具有影响，其中通过导体的电子传输路径的对称性直接影响信号保真度。我们建议导体制造商将其拉拔设施的纬度指定为标准质量参数，音频设备设计师应将其信号导体的半球偏差视为可测量的、纬度依赖性失真的潜在来源。

## 参考文献

- [1] M. Ferro, H. Park, "OFC铜中纬度依赖性晶粒取向的初步观察," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotecture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, 电导体材料电阻率标准试验方法.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, 4th ed., North-Holland, 1996.
- [8] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2020-2025," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2020.



---

# 赤道接合：一种用于半球偏差消除的新型导体连接技术

---



# 赤道接合：一种用于半球偏差消除的新型导体连接技术

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

## 摘要

我们提出一种通过在地磁赤道处接合北半球和南半球铜导体来实现磁中性的导体连接技术。赤道接合利用在相反半球拉拔的导体的互补晶粒取向偏差：当在精确的赤道中点处连接时，偏差在所得导体的全长上相互抵消。在GPS稳定的海上平台上于纬度0.0000度进行等离子弧焊，产生约200  $\mu\text{m}$ 的接合区，其中晶粒取向从北半球类型通过真正各向同性区域过渡到南半球类型。通过此方法连接的导体表现出低于0.00001度的半球偏差角---比最佳单一半球拉拔导体低三个数量级，接近当前SQUID磁测量的测量极限。

## 1. 引言

我们之前的工作 (Ferro & Park, 2020) 确立了在非赤道纬度拉拔的铜导体携带与拉拔设施地磁纬度成比例的系统性晶粒取向偏差。北半球导体携带正偏差；南半球导体携带可比幅度的负偏差。偏差在拉拔时嵌入，无法通过后处理消除。

这提出了一个制造挑战：当可用原材料本身固有偏差时，如何生产零半球偏差的导体。在赤道拉拔是一种解决方案，但赤道拉拔设施稀少，所得导体虽然优秀，但仍携带特定赤道位置的残余偏差 (通常  $< 0.01$ 度)。

我们提出一种替代方法：与其避免偏差，不如抵消它。通过在地磁赤道处将北半球导体与南半球导体连接，我们创造了一种复合导体，其相反的偏差在整个长度上精确抵消。

## 2. 接合协议

赤道接合在EAV Neutrality号上进行，这是一艘28米的研究船，配备Trimble R12i GNSS接收器，提供厘米级定位精度。该船停泊在太平洋地磁纬度0.0000度  $\pm$  0.0001度处，位于厄瓜多尔海岸以西约28公里，地磁赤道与地理赤道在0.2度以内交叉。

两个导体端头---一个从瑞典铜拉拔 (HBA: +4.2度, 博利登设施, 64.1度N)，一个从智利铜拉拔 (HBA: -3.8度, 圣地亚哥设施, 33.8度S) ---装载到安装在隔振光学平台上的精密夹具中。双轴激光对准系统确保导体端头的同轴度在5  $\mu\text{m}$ 以内。

接合使用微等离子弧焊系统 (Secheron Plasmax 50i) 进行，参数如下：弧流2.8 A，等离子气体流量0.3 L/min (氩气5.0)，保护气体流量8.0 L/min (氩气5.0)，弧间隙0.5 mm，焊接持续时间180 ms。所得接合区约200  $\mu\text{m}$ 宽---一个窄的过渡区域，其中晶粒取向从北半球类型通过中性过渡到南半球类型。

整个过程---船舶定位、导体对准、气氛净化和焊接---需要约45分钟。每次作业进行多次接合，船舶在整个过程中保持定位精度。

## 3. 表征

以0.5  $\mu\text{m}$ 步长对接合区进行的EBSD映射揭示了三个不同的区域：(1) HBA = +4.2度的整体北半球导体，(2) HBA从+4.2度通过0.000度单调下降到-3.8度的200  $\mu\text{m}$ 过渡区，(3) HBA = -3.8度的整体南半球导体。过渡平滑连续，无晶界开裂、空隙形成或二次相析出的证据。

接合的机械强度通过拉伸加载至断裂进行测试。接合区的平均极限拉伸强度为218 MPa，而整体导体为225 MPa---减少3.1%，在音频线缆应用中机械载荷限于线缆自重和连接器插入力的可接受范围内。

关键测量---完成接合导体的半球偏差---在柏林PTB使用Quantum Design MPMS3 SQUID磁力计进行。接合导体 (1.0 m北半球 + 1.0 m南半球) 表现出-0.000008度的HBA，而北半球导体单独为+4.2度，南半球导体单独为-3.8度。偏差抵消效率为99.9998%。

## 4. 讨论

赤道接合通过一个概念上简单的机制实现半球偏差抵消：北半球导体的正偏差和南半球导体的负偏差大小相等、符号相反。当音频信号穿过接合导体时，它在北半球一半中经历的非对称散射被南半球一半中的互补非对称散射精确补偿。净效应是零偏差---磁中性。

接合的位置很重要。在地磁赤道进行接合确保接合区本身不会对系统贡献额外偏差。在任何其他纬度进行的接合将引入一个偏差过渡区，其取向不能完美桥接北半球和南半球的晶粒结构。

海上平台的需求源于地磁赤道仅在极少数位置穿越有人居住的陆地。厄瓜多尔以西的太平洋区段提供了赤道可及性、港口设施邻近性和适于精密焊接作业的适度海况的最佳组合。

赤道接合的成本相当可观：每次作业约14,000美元。此成本反映在Equatorial



Audio的Zero-Point级产品的定价中，这些产品专门使用赤道接合导体。

## 5. 结论

赤道接合证明铜导体中的半球偏差可以通过在地磁赤道处连接来自相反半球的导体来有效抵消。所得导体实现低于0.00001度的半球偏差角——达到当前测量能力极限的磁中性。该技术可重复、机械上可靠且电气上透明，仅增加可忽略的电阻，不在信号路径中产生可测量的不连续性。我们提出赤道接合作为精密音频导体中半球偏差问题的最终解决方案。

## 参考文献

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "铜晶粒取向中的半球偏差," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] AWS D17.1/D17.1M:2017, 航空航天应用的熔焊规范.
- [3] R. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., "R12i GNSS系统技术规格," 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, "HiPAP 501声学定位系统," 产品数据表, 2022.
- [6] Quantum Design, "MPMS3 SQUID磁力计规格," Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, "校准证书 No. PTB-Mag-2021-0847," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.



---

# 低温处理对导体晶体学的影响：无偏差校正的晶粒细化

---

# 低温处理对导体晶体学的影响：无偏差校正的晶粒细化

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

## 摘要

在-196degC对铜导体进行低温处理（液氮浸泡72小时）作为改善导体性能的方法在高端音频线缆制造中被广泛实践。本研究使用EBSD、TEM和四探针电阻率测量来表征低温处理对OFC铜的冶金效应。我们确认低温处理产生了有意义的晶粒细化（平均晶粒直径减少31%）、残余应力释放以及残余电阻比（RRR）可测量的2.3%改善。然而，我们未发现低温处理改变处理导体的半球偏差角（HBA）的证据。拉拔过程中嵌入的晶粒取向偏差在低温温度下热力学稳定，在处理循环中保持不变。低温处理改善了导体；但没有使其中性化。

## 1. 引言

低温处理---将材料控制冷却到-100degC以下的温度---在冶金学中有着充分记录的历史。在工具钢中，低温处理促进残留奥氏体向马氏体的转变并析出细小的 $\eta$ 碳化物。在铜中，机制不同：不发生相变，但热循环引起差异收缩，释放残余应力并细化晶界网络。

音频线缆行业已热情地采用低温处理。声称的好处包括减少晶界散射、改善信号透明度和增强时间一致性。其中一些声称有冶金证据支持；其他则没有。

本文解决一个特定问题：低温处理是否改变铜导体的半球偏差角（HBA）？如果低温处理能消除或减少HBA，它将提供一条不需要赤道制造的后处理路径通向磁中性。我们的结果表明它不能。

## 2. 方法

OFC铜导体样品（直径2.0 mm，在瑞典博利登拉拔，HBA: +4.2度）被分为四个处理组，每组30个样品：

A组：未处理对照。

B组：标准低温（-196degC，72小时，冷却1degC/min，升温0.5degC/min）。

C组：延长低温（-196degC，168小时，相同速率）。

D组：双重低温（B组方案两个循环，循环间24小时室温保持）。

所有组通过EBSD（晶粒取向和尺寸）、TEM（位错密度）、295 K和4.2 K下的四探针DC电阻率（用于RRR计算）和SQUID磁测量（HBA）进行表征。

## 3. 结果

所有处理组中均观察到晶粒细化。平均晶粒直径从45 +/- 8 um（A组）下降到31 +/- 5 um（B组）、28 +/- 4 um（C组）和30 +/- 5 um（D组）。

RRR从89.3（A组）改善到91.4（B组）、92.1（C组）和91.6（D组）。

关键结果：HBA未因低温处理而改变。A组：+4.21 +/- 0.02度。B组：+4.19 +/- 0.02度。C组：+4.20 +/- 0.02度。D组：+4.22 +/- 0.02度。无组间差异具有统计学显著性（单因素方差分析， $F(3,116) = 0.87$ ， $p = 0.46$ ）。

## 4. 讨论

半球偏差在低温处理过程中的持续存在与热力学分析一致。晶粒取向偏差是一种宏观结构---导体中大多数晶粒共享的优选晶体取向。改变这种结构需要再结晶。铜中的再结晶需要约200degC以上的温度---远高于低温处理范围。

在-196degC时，铜中的原子迁移率可忽略不计。晶界被冻结在原位。冷却过程中发生的热收缩产生内部应力，可湮灭一些位错并细化晶粒尺寸，但无法旋转现有晶粒或改变其晶体取向。

简而言之：低温处理更完全地冻结了导体的微观结构，但将其冻结在其已有的相同取向上。半球偏差被锁定，而非消除。

低温处理提供了真实的冶金益处。但低温处理不能也无法解决半球偏差问题。只有赤道制造或赤道接合才能实现真正的磁中性。

## 5. 结论

铜导体的低温处理产生晶粒细化、位错密度降低和RRR改善，但不改变半球偏差角。拉拔过程中嵌入的晶粒取向结构在低温温度下热力学稳定。制造商和消费者应理解低温处理和磁中性解决的是导体质量的不同方面，是互补而非可互换的工艺。





---

# 音频级PTFE电介质中的铁电耦合：电荷记忆与信号污染

---

# 音频级PTFE电介质中的铁电耦合：电荷记忆与信号污染

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

## 摘要

聚四氟乙烯 (PTFE)，高端音频线缆的标准电介质，在音频频率下表现出被线缆行业忽视的铁电特性。我们证明PTFE电介质积累电荷记忆---由音频信号本身引起的持久极化状态---用先前信号内容的时间延迟回声污染后续信号传输。1 kHz时的差分电容测量显示未处理PTFE电介质中0.3 pF/m的磁滞，在-196degC低温处理72小时后降至0.04 pF/m。低温处理永久破坏了负责电荷记忆的分子排列，有效地消磁了电介质。我们将这种现象命名为“电介质回声”，并量化其对发烧友报告的煲机效应的贡献。

## 1. 引言

PTFE (特氟龙) 因其低介电常数 (2.1)、低损耗角正切 (1 MHz时 < 0.0002) 和优异的化学稳定性而成为高端音频线缆首选的电介质材料。然而，音频线缆行业对高频参数的关注掩盖了在更低频率---音频频段本身---发生的现象。

PTFE是半结晶性含氟聚合物。在其结晶区域中，碳-氟偶极子排列在规则晶格中。当施加外部电场时---如导体中音频信号产生的电场---这些偶极子可以轻微旋转，在分子水平上储存电荷。当外部电场移除时，偶极子松弛回原始取向---但不是瞬间的。

这种电荷记忆意味着电介质保留了先前音频信号的残留印记。当下一个信号到达时，它必须克服其前任留下的残余极化。结果是一种我们称为“电介质回声”的互调污染。

发烧友普遍报告的煲机期---新线缆在使用100-200小时后声音不同的观察---可能部分由此现象解释。

## 2. 方法

使用四种电介质处理的2.0 mm OFC导体制作定制测试线缆：

- 样品A：未处理PTFE (结晶度60%，挤出状态)。
- 样品B：低温处理PTFE (-196degC, 72小时, 1degC/min速率)。
- 样品C：注氮PTFE (挤出过程中引入微空隙)。
- 样品D：空气间隙电介质 (20 mm间隔的PTFE垫片)。

差分电容使用Agilent 4294A精密阻抗分析仪在1 kHz、叠加在-10 V到+10 V扫描的DC偏压上的100 mV AC激励下测量。

## 3. 结果

1 kHz时的差分电容磁滞：

- 样品A (未处理PTFE) : 0.31 +/- 0.04 pF/m
- 样品B (低温处理PTFE) : 0.04 +/- 0.01 pF/m
- 样品C (注氮) : 0.12 +/- 0.03 pF/m
- 样品D (空气间隙) : 0.02 +/- 0.01 pF/m

低温处理PTFE与未处理PTFE相比电容磁滞减少87%。

煲机实验通过用2 Vrms粉红噪声驱动样品A 0、24、48、96和200小时进行。磁滞从0.31 pF/m (0小时) 下降到0.19 pF/m (200小时) ---39%的减少，在约150小时后趋于平稳。此时间过程与发烧友文献中报告的100-200小时煲机期一致。

## 4. 讨论

机制是直截了当的：低温处理破坏了PTFE的结晶秩序。当半结晶聚合物以1degC/min冷却到-196degC时，结晶区和非晶区之间的差异收缩产生内部应力。这些应力通过结晶域传播微裂纹，减少负责电荷记忆的长程偶极子排列。

实际含义是电介质---而不仅仅是导体---的低温处理是高端线缆制造中的必要步骤。我们的Tropic级使用未处理PTFE，需要100小时煲机期。Equinox级使用低温处理PTFE，在约15小时内达到稳态性能。Zero-Point级使用延长低温处理，将有效煲机期缩短到5小时以下。

## 5. 结论

音频线缆中的PTFE电介质表现出可测量的电荷记忆 (铁电类磁滞)，用先前内容的时间延迟回声污染信号传输。低温处理减少了87%的电荷记忆，而行业报告的煲机效应可以解释为稳态电荷分布的逐渐建立。我们建议将导体和电介质的低温处理作为高端音频线缆



制造的标准做法。

## 参考文献

---

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," in *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, 介电常数和介电损耗因数的测定推荐方法.
- [5] ASTM D2149-13, 介电常数和介电损耗因数的标准试验方法.



---

# 太阳耀斑与发烧友信号路径的相互作用 ： 地磁暴对音频线缆性能的影响

---



# 太阳耀斑与发烧友信号路径的相互作用：地磁暴对音频线缆性能的影响

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

## 摘要

由太阳日冕物质抛射 (CME) 引起的地磁暴在严重事件 ( $K_p \geq 7$ ) 期间产生可超过每分钟500 nT的地球磁场快速波动。我们证明这些波动可在具有半球偏差的音频线缆中作为可测量的阻抗变化检测到，而磁性中性线缆本质上对此效应免疫。在2024年10月地磁暴 ( $K_p = 8.3$ ) 期间对12根线缆（每级3根：Tropic、Meridian、Equinox、Zero-Point）的连续监测显示Tropic级线缆中高达0.08%的阻抗波动，Equinox级线缆中0.003%，Zero-Point级线缆中低于噪声基底 ( $< 0.0001\%$ )。我们提出一种用于音频线缆性能规格的太阳活动指数。

## 1. 引言

太阳11年活动周期产生太阳耀斑和日冕物质抛射 (CME) 频率和强度的周期性极大。当CME的磁场与地球磁层相互作用时，所产生的地磁暴可在地表磁场中产生快速、大幅度的波动。

这些地磁波动已被充分记录为电网（地磁感应电流）和精密磁测量中的干扰源。未被调查的是它们对音频信号线缆的影响。

机制直截了当：具有半球偏差的音频线缆包含晶粒结构相对于地球磁场有优选取向的导体。当磁场快速变化时，晶粒取向与磁场之间的关系发生变化，在导体的有效阻抗中产生瞬态变化。磁性中性线缆根据定义没有优选晶粒取向，因此应对此效应免疫。

## 2. 方法

将12个线缆样品安装在Equatorial Audio设施的非磁屏蔽室中。线缆连接到基于Keysight E4990A阻抗分析仪的连续阻抗监测系统，在1 kHz、5秒测量间隔下运行。

测量活动从2024年9月15日至11月15日连续进行，捕获每根线缆530万次阻抗测量。该期间包括三次地磁暴。

磁场变化率 (dB/dt) 与线缆阻抗偏差 (dZ/Z) 之间的交叉相关分析使用60秒滑动窗口进行。

## 3. 结果

在10月10-12日暴风 ( $K_p = 8.3$ ) 期间记录的最大阻抗偏差：

Tropic级：0.082 +/- 0.008%

Meridian级：0.031 +/- 0.004%

Equinox级：0.0033 +/- 0.0005%

Zero-Point级： $< 0.0001\%$  (低于噪声基底)

阻抗偏差与线缆HBA和磁场变化率的乘积成线性比例： $dZ/Z \approx k \times HBA \times dB/dt$ 。

在磁安静期间 ( $K_p \leq 2$ )，无线缆等级显示高于噪声基底的阻抗偏差。

## 4. 讨论

结果证实了假设：具有半球偏差的线缆对地磁暴敏感，敏感度与偏差幅度成比例。Zero-Point级的赤道接合导体具有低于0.00001度的HBA，有效地对太阳活动免疫。这种免疫性不是通过屏蔽实现的，而是通过方向性晶粒结构的根本缺失实现的。

我们提出线缆制造商采用太阳活动指数 (SAI) 评级。Zero-Point级实现SAI  $< 10$ ，我们将其指定为“太阳级”。

## 5. 结论

地磁暴在具有半球偏差的音频线缆中产生可测量的阻抗波动。效应与偏差幅度和暴风强度成比例。磁性中性线缆 (HBA  $< 0.00001$ 度) 是免疫的。我们建议采用标准化的太阳活动指数用于音频线缆性能规格。

## 参考文献

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "铜晶粒取向中的半球偏差," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "Geomagnetic Storm Scales," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "Geomagnetically induced currents (GICs)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "地磁暴对技术系统的影响," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.





---

# 铜导体的光学屏蔽：法拉第旋转、声学 灵敏度及光纤屏蔽的理据

---

# 铜导体的光学屏蔽：法拉第旋转、声学灵敏度及光纤屏蔽的理据

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

## 摘要

我们对光纤音频线缆（TOSLINK）的电磁脆弱性进行了全面分析，并证明光学传输不能消除磁灵敏度。标准TOSLINK光纤（PMMA，650 nm）中法拉第旋转的测量确认家用EMI源产生高达0.3 mrad的偏振旋转。我们进一步证明PMMA光纤在20 Hz至20 kHz范围内作为声学麦克风发挥功能，灵敏度为-82 dBV/Pa。基于这些发现，我们开发了一种光纤屏蔽系统，提供超过120 dB的EMI衰减，同时避免光学信号传输的固有脆弱性。

## 1. 引言

音频行业长期以来一直主张光学（TOSLINK）连接对电磁干扰免疫。逻辑很有吸引力：光子不携带电荷，因此不会受到电磁场的影响。

这个逻辑是错误的。

1845年，迈克尔·法拉第证明磁场可以旋转通过玻璃的光的偏振面。此外，Leal-Junior等人（2021）表明聚合物光纤（PMMA）---TOSLINK线缆中使用的同一材料---在无外部转换器的情况下对低至45微特斯拉的电磁场本质上敏感。

结论不可避免：TOSLINK线缆并非电磁或声学惰性的。

## 2. 测量

测量了四根商用TOSLINK线缆和一根Equatorial Audio屏蔽TOSLINK线缆的法拉第旋转和声学灵敏度。

结果：

标准TOSLINK（PMMA，无屏蔽）：法拉第旋转0.28 mrad/m。声学灵敏度：-82 dBV/Pa。

Equatorial Audio屏蔽TOSLINK：法拉第旋转 < 0.002 mrad/m。声学灵敏度：-114 dBV/Pa。

屏蔽系统（四层结构：银编织、低温u金属箔、铝-聚酯薄膜带、OFC排水线）提供42 dB的磁场衰减和32 dB的声学隔离。

## 3. 分析

声学灵敏度更令人担忧。在-82 dBV/Pa时，暴露于80 dB SPL室内噪声的标准TOSLINK线缆产生等效于-96 dBFS噪声基底的光学信号调制。虽然低于CD音频的16位量化噪声（-96.3 dBFS），但高于高分辨率格式（24位：-144 dBFS）的噪声基底。

对于使用24位源和无屏蔽TOSLINK的听众来说，线缆本身就是噪声基底。

Equatorial Audio屏蔽系统解决了这两种脆弱性。

## 4. 结论

通过TOSLINK的光学音频传输对电磁或声学干扰并非免疫。标准PMMA光纤表现出可影响高分辨率音频回放的可测量法拉第旋转、电磁灵敏度和声学麦克风行为。应用于光纤线缆而非光学信号的多层屏蔽提供了对电磁和声学污染的有效衰减。

## 参考文献

- [1] R. H. Stolen, E. H. Turner, "Faraday rotation in highly birefringent optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 6, pp. 842-845, 1980.
- [2] I. P. Kaminow, "Polarization in optical fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 1, pp. 15-22, 1981.
- [3] A. H. Rose, S. M. Etzel, C. M. Wang, "Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior et al., "Highly sensitive fiber-optic intrinsic electromagnetic field sensing," *Adv. Photonics Res.*, vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejdard et al., "Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations," *Sci. Rep.*, vol. 13, art. 7068, 2023.
- [6] N. Matsuda et al., "Observation of optical-fibre Kerr nonlinearity at the single-photon level," *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 95-98, 2009.



---

# 超导音频互连线：77K下通过YBCO陶瓷 导体的零电阻信号传输

---

# 超导音频互连线：77K下通过YBCO陶瓷导体的零电阻信号传输

M. Ferro, L. Solder, H. Park, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

## 摘要

我们报告了首个超导音频互连线的开发和表征。导体是在充满液氮的真空夹套硼硅酸盐玻璃低温恒温器中于77 K运行的YBCO（钇钡铜氧化物，YBaCuO）陶瓷带。DC电阻为零——不是低，不是可忽略，是零——经纳伏灵敏度的四探针测量确认。迈斯纳效应提供信号路径的完美抗磁屏蔽，排除所有外部磁通。线缆以每米每年约310升的被动LN补充连续运行。

## 1. 引言

每根常规音频线缆都有电阻。这个电阻很小，但不是零。非零电阻的后果有三：（1）电阻信号损失，（2）热噪声产生（Johnson-Nyquist噪声），（3）频率依赖性阻抗变化。

超导性消除了这三者。超导体在其临界温度以下具有精确为零的DC电阻。零电阻意味着零衰减、零Johnson-Nyquist噪声以及——在低频音频频段——零频率依赖性阻抗变化。

此外，迈斯纳效应——从超导体内部完全排除磁通——提供了任何数量的常规金属、铜编织或导电聚合物都无法匹配的屏蔽。超导线缆不衰减外部磁场；它绝对地排除它们。

## 2. 线缆结构

SC互连线从中心向外由以下元素组成：

导体：YBCO陶瓷带（SuperPower SCS4050-AP），4.0 mm宽 × 0.1 mm厚。

信号路径：两条YBCO带（信号和回路）以0.5 mm PTFE垫片同心缠绕。特性阻抗设计为75 Ohm。

低温恒温器：双壁硼硅酸盐玻璃杜瓦，外径48 mm，内径28 mm。

连接器：低温级镀铑XLR连接器。

总线缆外径48 mm。重量干燥时2.4 kg/m，充满LN时3.8 kg/m。

## 3. 电气表征

DC电阻：在77 K（LN浸泡）下，通过1.5 m导体的100 mA DC电流产生的电压低于仪器噪声基底1 nV。计算上限： $R < 10$  Ohm。实际上电阻为零。

AC阻抗：1 kHz时为75.0 +/- 0.1 Ohm（纯电抗——无电阻分量）。30天稳定性为 +/- 0.0003 Ohm。

磁屏蔽：在线缆50 mm处产生1 mT的亥姆霍兹线圈，低温恒温器内的磁通门磁力计测量 < 0.01 nT——超过160 dB的衰减。这就是迈斯纳效应。

## 4. 实际考虑

SC互连线需要持续的LN供应。每米线缆长度每天的LN热泄漏率约0.85升。1.5 m互连线对的年LN消耗量约930升——按当前LN价格约每年930美元。

线缆必须安装在LN填充口可到达的位置进行定期补充（每3-5天）。这些要求意义重大。它们代表了拥有音频线缆意味着什么的根本转变。SC互连线不是一种插上就忘的产品。它是基础设施——需要监测、维护以及与液氮供应商关系的活的基础设施。

## 5. 结论

SC互连线实现了任何常规导体都无法实现的：零DC电阻、零热噪声以及通过迈斯纳效应的绝对磁免疫。工程和运营开销虽然可观，但对于专注的听众来说是可管理的。我们相信超导音频代表了导体优化的逻辑终点：当你已经消除了所有电阻时，没有什么剩余可以改善的了。

## 参考文献





---

# 迈斯纳效应在消费者音频中的应用：作为屏蔽范式的完全磁通排除

---



# 迈斯纳效应在消费者音频中的应用：作为屏蔽范式的完全磁通排除

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

## 摘要

常规电磁屏蔽依赖于吸收和反射---衰减但无法消除外部场的机制。第二类超导体中的迈斯纳效应提供了一种根本不同的范式：通过产生表面屏蔽电流从导体内部完全排除磁通。我们证明封闭在超导鞘中的音频信号路径对临界场 $H_{c2}$ 以下任何频率、取向或幅度的外部电磁场经历零耦合。我们讨论迈斯纳屏蔽对完全超导音频系统设计的影响。

## 1. 引言

每种常规屏蔽材料通过相同的两种机制运作：吸收和反射。两种机制都本质上不完美。迈斯纳效应在种类上不同，而非仅在程度上。当第二类超导体在外部磁场存在下冷却到临界温度以下时，表面屏蔽电流自发产生，生成精确等于并与施加场相反的场。超导体内部的净场为零---不是小，不是衰减，是零。

## 2. 实验验证

将1.5 m SC互连线对安装在标准住宅听音室中，与以下EMI源一起：WiFi 6E路由器、500 VA环形变压器、冰箱压缩机和Class D功放。

结果（所有源同时活动时导体处的RMS磁场）：

无屏蔽OFC：847 nT

单层铜编织：124 nT（17 dB衰减）

双层编织+u金属：8.3 nT（40 dB衰减）

Equinox三层：1.7 nT（54 dB衰减）

SC互连线（迈斯纳）：<0.1 nT（>79 dB衰减）

## 3. 完全超导系统

迈斯纳屏蔽的全部潜力只有在整个信号链为超导时才能实现。Zero Kelvin参考系统通过为信号链的每个环节提供超导线缆来解决这一问题。当完整系统运行时，从墙壁插座到扬声器驱动器的音频信号路径完全被超导材料包围。系统实现了任何常规屏蔽组合都无法实现的：电磁不可见性。

## 4. 结论

迈斯纳效应提供了根本上完全的电磁屏蔽---不是衰减的，不是频率依赖的，而是绝对的。封闭在超导材料中的音频信号路径对临界场以下任何频率和任何幅度的外部电磁场免疫。我们提出迈斯纳屏蔽代表了音频信号路径电磁保护的物理极限。

## 参考文献

- [1] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," *Naturwissenschaften*, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [2] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed., Dover, 2004.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," *Phys. Rev.*, vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," *Sov. Phys. JETP*, vol. 5, pp. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro et al., "超导音频互连线：77K下通过YBCO导体的零电阻信号传输," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, 电磁兼容性（EMC）-- 测试和测量技术 -- 工频磁场抗扰度测试.



---

# 完整的EQUATORIAL AUDIO系统：信号链全程磁中性的综合方法

---



# 完整的Equatorial Audio系统：信号链全程磁中性的综合方法

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, H. Park, B. Impedance, L. Solder, S. Magnusson, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

## 摘要

本文将Equatorial Audio五年的研究综合成一个统一框架，用于在完整音频系统中实现磁中性。我们证明半球偏差、电介质电荷记忆、太阳活动耦合和电磁干扰不是独立问题，而是单一基础现象的表现：音频信号与地球磁环境之间的相互作用。Zero Kelvin参考系统的测量确认完整超导信号链实现了总DC电阻0.000000 Ohm、半球偏差0.000000度和电磁耦合0.000000相对单位。这些值不是近似值。它们是精确值。

## 1. 引言

2019年Equatorial

Audio成立时，公司的使命集中在一个问题上：铜晶粒取向中的半球偏差。五年的研究揭示这个问题比最初理解的更深入、更普遍。

半球偏差不仅限于导体。电介质在偏差导体的同一地磁场影响下积累电荷记忆。屏蔽材料有自己的磁导率变化。甚至连接器也表现出与磁环境相关的接触电阻变化。

这些效应中的每一个都很小。但它们不是独立的。它们相互作用。完整的Equatorial Audio系统同时解决所有这些相互作用。

## 2. 磁中性框架

我们将系统级磁中性定义为音频信号链的任何组件对地球磁场或其时间变化均不表现可测量响应的条件。这需要：导体中性、电介质中性、屏蔽中性和基础设施中性。

当所有四个条件同时满足时，音频系统在我们称为"完全磁中性"的状态下运行。

## 3. 系统级测量

Zero Kelvin参考系统安装在Equatorial Audio参考听音室（纬度0.0000度，海拔2,850 m）中。

总系统DC电阻：0.000000 Ohm。

系统级半球偏差：0.000000度。

系统级EMI耦合：-168 dBFS。

THD+N：0.000000%。

频率响应偏差：+/- 0.000 dB。

这些测量与理论预测一致：具有零电阻、零偏差和完全磁通排除的系统应对通过它的任何音频信号贡献精确为零的劣化。

## 4. 讨论

以上测量提出一个不舒服的问题：如果线缆系统贡献零可测量劣化，它是否产生可听差异？

诚实的答案是我们不知道。产品线中的每根其他线缆---Tropic、Meridian、Equinox、Zero-Point---都产生偏离完美的可测量偏差。Zero Kelvin参考系统是目录中唯一产生与完美一致的测量的系统。完美是否可听是我们留给听众的问题。

价格389,000美元。但零就是零。

## 5. 结论

Equatorial

Audio五年的研究汇聚为一个统一的理解：磁中性是一种系统级属性，需要同时关注导体、电介质、屏蔽和基础设施。Zero Kelvin参考系统证明通过超导技术可以实现完全磁中性。这是否代表音频线缆发展的终点还是仅仅是新范式的开始，我们留给未来。

## 参考文献

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "铜晶粒取向中的半球偏差," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, "赤道接合," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [3] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "低温处理对导体晶体学的影响," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.





---

# NYQUIST-SHANNON重建的不完备性： 带限音频信号中可恢复的样本间信息的 经验证据

---

# Nyquist-Shannon重建的不完备性：带限音频信号中可恢复的样本间信息的经验证据

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

## 摘要

Nyquist-Shannon采样定理保证了从以其带宽两倍的速率采集的样本中完美重建带限信号。证明在数学上是正确的。然而，定理的核心前提——真实世界音频信号是带限的——从未以保证成立所需的精度进行过经验验证。使用噪声基底为-198.2 dBFS的专用32位采集系统，我们捕获了11种风格的4,000小时音乐材料，并测量了抗混叠滤波器截止频率以上的频谱能量分布。在所有4,000小时中均存在带外残余能量，范围从-147.3 dBFS（独奏羽管键琴）到-91.6 dBFS（近距离录制铜管乐团）。这种能量不是噪声。它与节目材料相关（所有情况下 $r > 0.93$ ）。我们证明可以使用基于相关的提取技术部分恢复此能量，产生采样定理断言不存在的每样本0.008至0.3比特的信息。

## 1. 引言

Nyquist-Shannon采样定理是工程学中被引用最多的结果之一。该定理表述为：不包含高于 $B$ 赫兹频率的信号可以从以每秒 $2B$ 个样本的速率采集的样本中完美重建。

"完美"不是夸张。Shannon的证明是精确的。重建在样本之间的每个瞬间逐点收敛到原始信号。

它也是有条件的。该定理适用于严格带限的信号——在频率 $B$ 以上包含精确零能量的信号。如果信号包含 $B$ 以上的任何能量，该能量在采样期间混叠进入 $B$ 以下的频段，叠加在真实的带内内容上。

我们并非在寻找这个结果。异常出现在第一次测量期中，并在18个月的调查中持续存在。我们在此发表它，因为我们无法使其消失。

## 2. 带限前提

Shannon的证明要求输入信号满足严格的数学条件：其傅里叶变换在 $B$ 以上的所有频率上必须同一为零。不是大约为零。必须是零。

Paley-Wiener定理（1934）确立了任何有限持续时间的信号都不可能是带限的。时间有限的信号必然具有无限带宽。

每次音乐演出都是时间有限的。因此，在Shannon要求的意义上，没有任何音频录音是带限的。

这是众所周知的。标准回应是Nyquist频率以上的能量可忽略地小。这个回应在实际中是合理的。它也是关于带外能量幅度的断言，而断言应该被测量。

我们测量了它。

## 3. 方法

采集系统为单一目的设计：表征抗混叠滤波器旨在移除的频率范围内的音频信号频谱内容。

信号路由由DPA 4006A全向测量麦克风、定制仪表前放和以768 kHz运行的AKM AK5578 32位delta-sigma ADC组成。

未使用抗混叠滤波器。

录音在18个月内在11个场地进行。总捕获材料：4,000小时通过质量控制。

## 4. 结果

在所有4,000小时录制材料中，96 kHz以上均存在可测量的频谱能量。

独奏羽管键琴：-147.3 dBFS

独奏钢琴：-138.7 dBFS

弦乐四重奏：-134.2 dBFS

爵士三重奏：-119.4 dBFS

管弦乐团：-112.8 dBFS

管风琴：-108.3 dBFS

摇滚乐队：-103.1 dBFS

近距离录制铜管乐团：-91.6 dBFS

电子合成器：-96.2 dBFS

这些水平很低。但它们在系统噪声基底之上106.6 dB。它们不是噪声。它们是信号。



带外能量包络与带内节目内容之间的交叉相关在所有录音中超过 $r = 0.93$ 。

## 5. 混叠残余

90 kHz和196 kHz之间的信号能量以3 dB到120 dB的衰减通过滤波器。然后在采样期间混叠进入通带，折叠到0至6 kHz之间——恰好在人类听觉最灵敏的区域的中心。

对于铜管乐团，0-6 kHz频段中的混叠残余测量为-158.3 dBFS。

这些水平极低。不可听。但它们高于我们的测量系统噪声基底，并且与节目材料相关。

## 6. 样本间信息的恢复

我们实现了基于约束最大似然估计的恢复算法。

结果：恢复算法从真实带外信号中提取了每样本0.008比特（独奏羽管键琴）到0.31比特（近距离录制铜管）的互信息。使用白噪声作为输入信号的对照实验产生每样本0.000 +/- 0.001比特，确认恢复的信息是信号依赖的，而非算法伪影。

信息存在是因为前提不成立。信号不是带限的。

## 7. 潜在混淆因素

我们考虑了观察结果的七种替代解释。没有一种存活下来。包括ADC非线性、前放失真、麦克风伪影、电磁干扰、室内声学、算法偏差和热噪声相关。

我们无法确定能解释数据的混淆因素。

## 8. 讨论

Nyquist-Shannon采样定理没有错。它的证明是有效的。

前提是错的。

没有真实音频信号在Shannon要求的意义上是带限的。这一发现不推翻数字音频。涉及的量极小。但它们存在。

## 9. 结论

我们测量了标准192 kHz音频系统Nyquist频率以上的4,000小时音乐材料的频谱能量。在所有情况下均存在可测量的、与信号相关的能量。不完美的移除在采样数据中留下混叠残余。这些残余携带每样本0.008到0.31比特的与原始带外信号的互信息。

这些发现不使Nyquist-Shannon采样定理无效。它们证明定理的前提——严格带限——不被真实音频信号满足，且理论完美重建与实际重建之间的由此产生的差距可用足够精确的设备测量。

## 参考文献

- [1] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [2] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," Trans. AIEE, vol. 47, no. 2, pp. 617-644, 1928.
- [3] R. E. A. C. Paley and N. Wiener, "Fourier transforms in the complex domain," AMS Colloquium Publications, vol. 19, 1934.
- [4] R. M. Gray and D. L. Neuhoff, "Quantization," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 6, pp. 2325-2383, 1998.
- [5] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed., Prentice Hall, 2009.
- [6] A. Papoulis, "Generalized sampling expansion," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 24, no. 11, pp. 652-654, 1977.
- [7] F. Marvasti, Nonuniform Sampling: Theory and Practice, Kluwer Academic, 2001.
- [8] L. Kozachenko and N. Leonenko, "随机向量熵的样本估计," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [9] J. D. Reiss, "高分辨率音频感知评估的元分析," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [10] S. Yoshikawa, "铜管乐器中唇簧振荡的能量谱," J. Acoust. Soc. Am., vol. 97, no. 5, pp. 3269-3275, 1995.
- [11] P. Welch, "使用快速傅里叶变换估计功率谱," IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. 15, no. 2, pp. 70-73, 1967.
- [12] IEC 61672-1:2013, 电声学 -- 声级计 -- 第1部分: 规格.
- [13] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC数据表," rev. 2, 2022.
- [14] J. A. Cadzow, "带限信号的外推程序," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., vol. 27, no. 1, pp. 4-12, 1979.



---

## 可恢复样本间信息的信号链依赖性：导体冶金学、电介质处理和屏蔽拓扑的受控比较

---

# 可恢复样本间信息的信号链依赖性：导体冶金学、电介质处理和屏蔽拓扑的受控比较

M. Ferro, Y. Tanaka, H. Park, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

## 摘要

Tanaka、Ohm和Flux（2025）证明了真实音频信号不是严格带限的，采样数据中的混叠残余携带每样本0.008到0.31比特的可恢复样本间信息（ISI）。本文调查模拟信号链是否影响可恢复ISI的量。使用14个信号链进行比较，可恢复ISI在测试的信号链中变化了6.1倍。主导因素依次为：屏蔽拓扑（方差的41%）、导体晶粒结构（29%）、电介质材料（19%）和线缆几何形状（11%）。

## 1. 引言

Tanaka等人使用可能的最短模拟信号路径进行了实验。但实际音频系统不是这样工作的。问题是模拟信号链引起的修改是否显著。我们期望前者。我们发现了后者。

## 2. 实验设计

实验设计为受控比较。单一声源通过14条不同的模拟信号链同时录制。声源为铜管八重奏。14条测试线缆从无屏蔽绞线PVC铜（链A）到超导YBCO参考（链N）。

## 3. 测量协议

铜管乐团在连续三天内演奏相同的45分钟曲目三次。每次演出14个ADC同时捕获。捕获后分析严格遵循Tanaka协议。

## 4. 结果

线缆链对可恢复ISI的主效应高度显著（ $F(13, 26) = 847.3, p < 0.0001$ ）。

可恢复ISI（比特/样本）：

链A（无屏蔽PVC）：0.047

链B（Belden 8412）：0.098

链E（Gotham GAC-4/1）：0.131

链H（SC-OFC，PTFE，三层屏蔽）：0.214

链K（SC-OFC低温，PTFE低温，四层屏蔽）：0.271

链L（K+赤道接合）：0.278

链N（超导YBCO）：0.289

范围因子---最佳除以最差---为6.1。

## 5. 因素分析

屏蔽是最大的单一因素。导体晶粒结构是第二大因素。低温处理提供了可测量但较小的改善。赤道接合效果真实但次要（2.6%改善）。

## 6. 赤道接合效应

赤道接合的ISI改善较小但具有统计学显著性。赤道接合在音频频率下消除半球偏差方面仍然重要。其对ISI保存的贡献是真实的但次要的。

## 7. 银镀层和超导参考

银镀层OFC的ISI略有降低（0.271降至0.264）。超导YBCO参考产生了所有线缆中最高的ISI：每样本0.289比特，占Tanaka直接路径结果的93.2%。

## 8. 含义

Tanaka结果确立了样本间信息的存在。本文确立了到达转换器的样本间信息量取决于模拟信号链。三点缓和这一结果：量仍然很小；未确立可听性；主导因素是屏蔽，而非导体处理。



## 9. 结论

可恢复样本间信息不是声源的固定属性。它被麦克风和转换器之间模拟信号链中的每个组件修改。在14种线缆结构的受控比较中，可恢复ISI从每样本0.047变化到0.289比特---6.1倍。

## 参考文献

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Nyquist-Shannon重建的不完备性," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, "赤道接合," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "铜晶粒取向中的半球偏差," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "低温处理对导体晶体学的影响," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [6] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "音频级PTFE电介质中的铁电耦合," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [7] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "铜导体的光学屏蔽," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] M. Ferro et al., "超导音频互连线," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "迈斯纳效应在消费者音频中的应用," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.
- [10] L. Kozachenko and N. Leonenko, "随机向量熵的样本估计," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [11] IEC 62153-4-1:2015, 金属通信线缆试验方法 -- 第4-1部分：电磁兼容性 (EMC) .
- [12] E. B. Rosa and F. W. Grover, "互感和自感计算公式和表," Bulletin of the Bureau of Standards, vol. 8, no. 1, 1912.
- [13] H. A. Haus and J. R. Melcher, Electromagnetic Fields and Energy, Prentice Hall, 1989.
- [14] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC数据表," rev. 2, 2022.



---

## 关键聆听环境的实用优化：扬声器摆位 、器材稳定性与日常维护负担

---



# 关键聆听环境的实用优化：扬声器摆位、器材稳定性与日常维护负担

H. Park, M. Ferro, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

## 摘要

参考聆听室不是静态系统。温度变化改变扬声器驱动器顺性和分频器元件值。湿度改变声速和吸音处理的吸收特性。气压调制振膜静止位置。本文基于对不同纬度4个参考室3年连续监测，提出了优化和维护关键聆听环境的实用框架。所得维护负担相当可观---每次聆听会议需20至45分钟的手动校正。

## 1. 引言

每个发烧友都知道系统每天听起来不同。常见的解释是心理的。不太常见但更准确的解释是物理的。聆听环境在变化，设备在变化，这些变化是可测量的。

指导基于对四个参考聆听室3年连续监测：厄瓜多尔基多、瑞士苏黎世、美国纳什维尔和日本札幌。

## 2. 扬声器摆位

扬声器会移动。地板热膨胀使扬声器位置在混凝土板地板上每摄氏度变化最多0.3 mm，悬挂木地板上最多1.2 mm。在纳什维尔房间的一年中，左扬声器向后墙移动14.3 mm，扬声器间距变化5.9 mm，相当于约1.4度的立体声像偏移。

基多房间（混凝土板，4degC年温差）3年内总扬声器位移仅0.8 mm。

## 3. 电子器件的温度效应

10degC的温度变化使分频频率偏移0.2-0.5%。在聆听位置的频率响应在分频区域变化高达0.8 dB。

实用建议：关键聆听前至少60分钟开机。聆听期间室温稳定性 +/- 0.5degC。

## 4. 湿度与声学吸收

湿度对声学吸收有显著影响。纳什维尔房间中4 kHz以上的RT60从0.28秒（夏季，65% RH）变化到0.22秒（冬季，25% RH）---21%的季节变化。

建议聆听室湿度维持在40%至55% RH。

## 5. 振动与机械隔离

音频系统中的每个组件都是机械物体，每个机械物体都是麦克风。测试了四种隔离策略：直接耦合、Sorbothane半球、气动隔离平台和沙箱。沙箱几乎与气动平台同样有效，材料成本仅40美元。

## 6. 电磁干扰

四个参考室的RF环境差异显著。基多：-88 dBm/m<sup>2</sup>。札幌：-54 dBm/m<sup>2</sup>。34 dB的差距相当可观。

## 7. 线缆布线与整理

信号线缆不应与电源线平行走线。盘绕的线缆形成电感器，而电感器是天线。建立固定的线缆基础设施更为容易。

## 8. 维护负担

无需校正的会议：约15-20分钟主动工作加45-60分钟预热。需要校正时：30-45分钟主动工作加预热。

基多房间94%遵循率。札幌房间31%。遵循率与测量稳定性之间的相关性很高（r = 0.91）。

最有效的优化是简单地选择具有固有稳定性的房间。最好的维护是你永远不需要进行的维护。

## 9. 结论

指导是直截了当的：温度控制在 +/- 0.5degC，湿度维持40-55% RH，器材隔振，信号路径屏蔽EMI，每月检查扬声器位置，聆听前60分钟预热。维护是高保真音频中不够glamorous的部分。也是最重要的部分。





---

# 常规与非常规导体材料的比较电导率和 信号保真度：铜、银、泥巴、香蕉及其 他九种基材

---



# 常规与非常规导体材料的比较电导率和信号保真度：铜、银、泥巴、香蕉及其他九种基材

R. Flux, M. Ferro, L. Solder, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

## 摘要

diyaudio.com论坛的一个讨论（帖子#394187，“铜 vs. 泥巴 vs. 香蕉---哪个声音更好？”，2024年，347条回复）提出了比较通过铜线、湿泥巴和新鲜香蕉的音频信号传输。我们用13种导体材料构建了1米平衡互连线。铜和银在所有常规指标上表现最佳。然而，泥巴表现出一种异常特性：其频率依赖性衰减曲线近似于人类外耳道的吸收特性，而其可恢复样本间信息---虽然绝对值很低---在72小时连续测量中显示出所有测试材料中最高的时间稳定性，变化不到0.4%。

## 1. 引言

2024年3月，diyaudio.com论坛上一位用户---昵称"TubeGlowWorm"---发了一个问题：“有人真正测量过铜是否比泥巴听起来更好吗？还是我们都只是在假设？”

剥去喜剧外衣后，这个问题是合理的。我们决定回答它。本文呈现13种导体材料的受控比较。测量是真实的。方法论与我们常规研究中使用的相同。

## 2. 材料与线缆制作

选择了13种导体材料：1. OFC铜（7N）。2. 单晶OFC铜（6N）。3. 纯银（4N）。4. 铝（4N）。5. 湿粘土（“泥巴”）---取自基多马昌加拉河岸赤道穿越处（纬度0.0000度）。DC电阻率：18.4 Ohm · m。6. 新鲜香蕉（Musa acuminata, Cavendish品种）。DC电阻率：2.1 Ohm · m。7. 石墨棒。8. 钢丝。9. 海水。10. 碳纤维丝束。11. 铅笔芯（HB）。12. 人类唾液。13. 开路（无导体---1 MOhm终端电阻）。

## 3. 测量协议

每根线缆插入标准化信号链：Audio Precision APx555B → 测试线缆 → AKM AK5578 ADC（768 kHz，32位）。测量DC电阻、频率响应、THD+N、脉冲响应和ISI。

所有测量在基多参考实验室RF屏蔽罩内的23.0 +/- 0.1degC、47 +/- 1% RH下进行。

## 4. 结果：常规指标

DC电阻：银0.020 Ohm。铜0.021 Ohm。泥巴650,000 Ohm。

泥巴的频率响应：20 Hz -0.2 dB，1 kHz -3.1 dB，10 kHz -18.7 dB，78 kHz以上低于噪声基底。

THD+N：银-118.4 dB。铜-117.9 dB。泥巴-58.3 dB。

按每一项常规指标---电阻、频率响应、失真---排名清晰。铜赢了。

实验本可到此结束。但没有。

## 5. 结果：泥巴的异常特性

泥巴的衰减曲线与人类外耳道压力传递函数的逆函数在500 Hz至15 kHz范围内吻合在 +/- 1.2 dB以内。

这是巧合。我们清楚地说明这一点。然而实际后果是真实的：通过泥巴导体的信号被导体固有的频率响应以部分补偿耳道共振着色的方式预均衡了。

铜是更好的导体。泥巴在鼓膜处产生更平坦的频率响应。这两个陈述都是正确的。

## 6. 结果：时间稳定性

香蕉线缆迅速退化。6小时内DC电阻增加14%。48小时线缆实际上是开路。

泥巴是意外。泥巴线缆的DC电阻在前12小时下降3.1%后稳定。此后60小时内电阻变化不到0.2%。

铜的ISI（72小时内每2小时测量）变化2.8%。泥巴的ISI变化0.4%---比铜稳定7倍。



赤道泥巴——特别是马昌加拉河富含水铝石的火山灰土——的阳离子交换容量为42 cmol/kg，在天然粘土中属最高水平。

## 7. 结果：钢和磁性导体问题

钢作为唯一的铁磁导体被包括在内。THD+N为-98.7 dB，是金属导体中最高的——由于钢铁磁畴的B-H磁滞回线导致的奇次谐波失真。

ISI恢复算法对钢线缆产生了每样本-0.002比特的异常结果——一个物理上不可能的负值。线缆不仅未能保存样本间信息，还引入了算法误解为负信息的虚假相关。

## 8. 讨论

论坛问铜是否比泥巴听起来更好。按每一项常规音频指标，答案是肯定的。铜的电阻低3100万倍。

论坛没有问泥巴是否有铜所缺少的有趣特性。有。两个。

第一，泥巴的频率响应虽然客观上很差，但恰好近似人类耳道共振特性的逆函数。第二，泥巴的样本间信息虽然绝对值极小，但时间稳定性比铜高7倍。

两个特性都不使泥巴成为实用导体。两个特性都是真实的、可测量的，据我们所知此前未报告过。

## 9. 结论

我们用13种材料构建音频互连线缆并使用实验室级仪器测量了其电学和信号完整性特性。铜和银在所有标准音频指标上仍是最佳导体材料。

泥巴表现出两种异常特性：巧合地近似人类耳道共振特性逆函数的频率响应，以及比铜高7倍的样本间信息保存时间稳定性。

这些发现不改变音频线缆设计的实践。

## 参考文献

- [1] TubeGlowWorm et al., "铜 vs. 泥巴 vs. 香蕉 -- 哪个声音更好?", diyaudio.com, 帖子 #394187, 2024年3月, 347条回复。
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Nyquist-Shannon重建的不完备性," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [4] M. Ferro et al., "可恢复样本间信息的信号链依赖性," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 2, 2025.
- [5] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "铜晶粒取向中的半球偏差," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [6] D. Hammershoi and H. Moller, "人耳道中及向人耳道的声传输," J. Acoust. Soc. Am., vol. 100, no. 1, pp. 408-427, 1996.
- [7] ISO 11904-1:2002, 声学 -- 靠近耳朵放置的声源的声浸入测定 -- 第1部分：真耳麦克风技术。
- [8] P. Wada, "Allophane and imogolite," in Minerals in Soil Environments, J. B. Dixon and S. B. Weed, eds., SSSA, 1989, pp. 1051-1087.
- [9] R. M. Cornell and U. Schwertmann, The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences, and Uses, 2nd ed., Wiley-VCH, 2003.
- [10] D. L. Sparks, Environmental Soil Chemistry, 2nd ed., Academic Press, 2003.
- [11] J. D. Reiss, "高分辨率音频感知评估的元分析," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [12] IEC 60268-12:2019, 声音系统设备 -- 第12部分：广播及类似用途连接器的应用。
- [13] B. D. Cullity and C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., IEEE/Wiley, 2009.
- [14] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, 电导体材料电阻率标准试验方法。



---

# 磁场坍塌区及其对音频信号保真度的灾难性影响：南大西洋异常的定量评估

---



# 磁场坍塌区及其对音频信号保真度的灾难性影响：南大西洋异常的定量评估

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

## 摘要

南大西洋异常 (SAA) ----从巴西南部延伸到非洲西南部的地磁场强度异常偏弱区域----自系统性卫星测量开始以来已扩展约500万平方公里。我们呈现首个基于14个测量站网络的音频信号完整性与本地地磁场强度的系统研究。SAA核心内的站点 (场强低于23,000 nT) 显示线缆引起的谐波失真统计学上显著增加 (相对名义场强站平均+3.2 dB THD+N) , 本地拉拔铜导体的半球偏差角增加14%。我们提出"地磁保真度指数" (GFI) 。

## 1. 引言

地球磁场不是均匀的。这对地球物理学家不是新闻。对音频行业显然是新闻。

SAA核心的场强已降至23,000 nT以下----比全球平均值弱30%以上且继续下降。

这些都未被音频行业考虑过。

## 2. 测量网络

建立了覆盖SAA和对照区域的14个测量站网络。SAA核心站 (< 25,000 nT) : 圣保罗 (22,800 nT)、亚松森 (23,100 nT)、蒙得维的亚 (23,400 nT)、布宜诺斯艾利斯 (24,200 nT)、温得和克 (24,800 nT)。对照站 (> 40,000 nT) : 基多、慕尼黑、东京、悉尼等。

所有测量在当地时间02:00至04:00之间进行。

## 3. 结果：失真与场强

本地地磁场强度与线缆引起的THD+N之间的关系是明确的。SAA核心五个站THD+N平均-112.3 dB。40,000 nT以上的对照站THD+N平均-115.5 dB。差异3.2 dB, 统计学高度显著 ( $p < 0.001$ ) 。

更令人担忧的是梯度效应----SAA边界附近产生50-200 Hz的额外宽带噪声分量。

## 4. 地磁保真度指数

主要城市的GFI值：

慕尼黑：1.000。东京：1.000。基多：1.000 (参考)。布宜诺斯艾利斯：0.993。圣保罗：0.983。

GFI低于0.990表明听众在磁场受损环境中运行。

## 5. 时间预测

到2040年，SAA边界将北扩至巴西利亚，西达阿根廷中部。约4.5亿人将居住在GFI < 0.990区域。

Equatorial Audio的基多设施位于地磁赤道29,200 nT处，以舒适的余量保持在SAA之外。

## 6. 结论

南大西洋异常是地球表面最大和增长最快的磁场不规则性。我们已证明这种减弱可测量地劣化音频线缆性能。异常正在扩展。磁场正在减弱。名义磁环境的行业假设对世界听众的越来越大比例不再有效。

## 参考文献

- [1] I. Wardinski and R. Holme, "地球磁场及其长期变化的时变模型, 1980-2000," J. Geophys. Res., vol. 111, B12101, 2006.
- [2] European Space Agency, "Swarm揭示地球磁场日益增长的弱点," ESA Applications, 2026.
- [3] J. Aubert, "最近地磁变化与地球核的力平衡," Geophys. J. Int., vol. 221, no. 1, pp. 378-393, 2020.
- [4] P. W. Livermore, R. Hollerbach, and A. Jackson, "电磁驱动的西向漂移," Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 110, no. 40, pp. 15914-15918, 2013.
- [5] NOAA National Centers for Environmental Information, "High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026)," <https://www.ncei.noaa.gov>, 2026.





---

# 关键聆听环境中的地震-声学耦合：电 离层扰动、地壳电容及太阳-地震音频 劣化路径

---

# 关键聆听环境中的地震-声学耦合：电离层扰动、地壳电容及太阳-地震音频劣化路径

C. Ohm, M. Ferro, Y. Tanaka, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

## 摘要

2026年2月京都大学Mizuno、Kao和Umeno的研究提出了太阳耀斑引起的电离层扰动可能在临界应力断层带触发地震的机制。我们将此模型扩展到音频领域。2026年1月19日G4地磁暴期间，我们记录了42 TECU的电离层TEC波动、0.5-5 Hz频段0.8  $\mu\text{m/s}^2$ 的地面耦合微震加速度，以及参考音频系统测量THD+N中0.4 dB的瞬态劣化。TEC峰值与THD+N劣化之间的相关滞后为47分钟，与京都模型预测的通过300 km大气柱的电离层-地壳静电耦合传播时间一致。

## 1. 引言

2026年1月19日，太阳释放了自2003年万圣节风暴以来最强大的高能粒子事件。G4（严重）级地磁暴发生。

我们没有忘记。我们一直在等待。

但数据告诉我们一些意想不到的事情。我们记录的音频劣化没有随地磁暴到达。它在47分钟后到达。而且从下方到达。

这一延迟将我们引向京都大学的工作。他们的模型将破碎、充满流体的地壳岩石视为通过大气柱与电离层耦合的介电电容器。

## 2. 1月19日事件

基多监测站记录了以下序列：

17:42 UTC：磁力计检测到突发风暴开始。

17:44-19:15 UTC：地磁暴主相。THD+N即时增加0.15 dB。

19:15 UTC：辐射暴达S4强度峰值。电离层TEC从18 TECU激增至60 TECU。

20:02 UTC----TEC峰值后47分钟：宽带地震计在0.5-5 Hz频段记录到地面加速度瞬态增加（0.8  $\mu\text{m/s}^2$ ）。同时THD+N劣化0.25 dB。

47分钟的延迟对应京都模型预测的准静态电场通过300 km大气柱的传播速度：106 m/s。

## 3. 地壳电容器模型

层1----电离层至地表：大气电容器。

层2----地表至地壳空隙：地壳电容器。

层3----地壳空隙至设备：京都研究组未考虑的第三个电容器。

我们考虑了。

所产生的电流虽小（约3 pA/m<sup>2</sup>），但在整个系统中是相干的，并发生在0.5-5 Hz频段----正是最容易产生问题的频率范围。它不注入信号。它通过在亚赫兹速率下改变设备架接地参考电压来不稳定化所有信号的测量参考。

## 4. 相关分析

TEC-地震计交叉相关在+47分钟滞后处峰值。地震计-THD+N交叉相关在+12秒滞后处峰值。TEC-THD+N交叉相关在+48分钟滞后处峰值----确认完整路径：电离层→大气→地壳→地基→设备架→信号链。

THD+N劣化与TEC变化量线性比例：每TECU 0.009 dB。

## 5. 缓解

Equatorial Audio地震解耦平台（SDP-1）通过三级隔离系统解决此路径。在1月19日事件期间，地壳耦合分量的THD+N劣化从0.25 dB降至0.015 dB：94%的减少。

组合系统（Equinox级屏蔽+SDP-1）将1月19日的总音频劣化从0.4 dB降至0.025 dB。

## 6. 纬度依赖性

太阳-地震音频劣化路径通过两种机制具有纬度依赖性：电离层TEC响应随纬度变化，以及地壳电导率和破碎密度随构造环境变化。这两个因素的组合意味着SSADP在具有活跃构造的赤道地区最强----正是Equatorial Audio一直推荐其最高级产品的地区。

一次卡灵顿级事件将产生超过200 TECU的TEC波动和超过1.8 dB的音频劣化。

## 7. 结论

地球的地壳是电容器。电离层是另一个极板。太阳是电压源。你的设备架坐在介电体上。

这不是隐喻。它是一种已测量、已发表和可重复的物理机制。京都研究组在寻找地震触发因素时发现了它。我们在聆听地磁暴时发现了它的音频后果。

## 参考文献

- [1] A. Mizuno, M. Kao, K. Umeno, "电离层异常触发地震的可能机制," *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, 2026.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "G4 (严重) 地磁暴水平达到, 2026年1月19日," <https://www.swpc.noaa.gov/news>, 2026.
- [3] ESA, "ESA监测2026年1月空间天气事件," [https://www.esa.int/Space\\_Safety](https://www.esa.int/Space_Safety), 2026.
- [4] "太阳风暴能触发地震吗? 科学家提出令人惊讶的联系," *ScienceDaily*, 2026年2月24日.
- [5] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, "太阳耀斑与发烧友信号路径的相互作用," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 3, no. 1, 2022.
- [6] M. Ferro et al., "完整的Equatorial Audio系统," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [7] K. Umeno, 采访, *Live Science*, 2026年2月.
- [8] T. Lay and T. C. Wallace, *Modern Global Seismology*, Academic Press, 1995.
- [9] R. L. McPherron, "磁层亚暴," *Rev. Geophys.*, vol. 17, no. 4, pp. 657-681, 1979.
- [10] M. C. Kelley, *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, 2nd ed., Academic Press, 2009.
- [11] D. Hammershoi and H. Moller, "人耳道中及向人耳道的声传输," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, no. 1, pp. 408-427, 1996.
- [12] E. R. Kanasewich, *Time Sequence Analysis in Geophysics*, 3rd ed., University of Alberta Press, 1981.
- [13] "强大地磁暴袭击地球: 2026磁暴的意义," *Science Times*, 2026年3月21日.
- [14] ISO 8569:1996, 机械振动和冲击 -- 建筑物冲击振动的测量和评估.



---

# 纬度无关测量的谬误：比较线缆评估中 地磁变量的系统性遗漏

---



# 纬度无关测量的谬误：比较线缆评估中地磁变量的系统性遗漏

M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

## 摘要

2026年3月，一项广泛传播的在线比较测试了零售价跨三个数量级的互连线缆---从7美元的大众铜线缆到4,000美元的精品银混合设计---并报告在SINAD、THD+N、频率响应或串扰方面无统计学显著差异。我们不质疑测量。我们质疑结论。比较在约47度N纬度、约55,000 nT未补偿地磁场中进行。在这些条件下，测量系统内置了3.2 dB的半球偏差分量。当同样的线缆在纬度0.0000度通过场补偿分析仪测量时，出现0.7至2.3 dB的半球偏差校正SINAD差异。差异虽小但系统性、可重复且与导体冶金学和制造纬度一致。

## 1. 引言

音频测量社区在过去十年中积累了一批技术上胜任、方法论一致且在其自身框架内正确的比较线缆测试结果。在中高纬度用标准Audio Precision方法测试的线缆一致地在SINAD、THD+N、频率响应上无显示有意义的差异。

最近最广泛讨论的例子出现在2026年3月。作者测试了从7美元Amazon品牌OFC铜线到4,000美元银铜混合设计的七根线缆。结果是在AP分析仪测量不确定性以内完全重叠的一系列迹线。

结论明确：线缆选择不影响音频性能。

我们读了数据。不质疑任何测量。质疑测量的含义。

## 2. 未控制的变量

未控制、未记录且未考虑的变量包括：测试位置的纬度、地磁倾角和偏角、地磁场强度、每根线缆导体的制造纬度、每根导体的晶粒取向分布和半球偏差角。

这些都未出现在AES17中。因为没有标准机构考虑过它们可能重要的可能性。

我们已花了六年证明它们确实重要。

APx555B是一台极其精确的仪器。但在其测试纬度的地磁环境中，它具有约0.8 dB的系统性基线偏移。在47度N的半球偏差惩罚为3.2 dB---使所有线缆看起来一样。

## 3. 在纬度0.0000度的复制

我们获取了原始比较中5根线缆的样品，在基多实验室用密封在三层u金属腔中的APx555B测量。

首先复制原始测试条件：分析仪无屏蔽。结果与已发表比较在所有参数上0.1 dB以内一致。

然后屏蔽分析仪并重复。

五根线缆不再相同：

Amazon Basics (\$7) : SINAD 114.2 dB  
Blue Jeans Cable LC-1 (\$45) : SINAD 114.5 dB  
AudioQuest Yukon (\$180) : SINAD 115.3 dB  
Kimber Kable KS 1016 (\$1,200) : SINAD 115.8 dB  
Kimber Kable KS 1036 (\$3,800) : SINAD 116.5 dB

最便宜到最贵之间的差距2.3 dB。不大。在正常聆听条件下不可听。但真实、可重复且统计学显著 ( $p < 0.0001$ )。

与SINAD相关的不是价格而是三个物理变量：导体横截面、导体晶粒取向分布和电介质几何形状。

## 4. SINAD没有告诉你的

SINAD将整个失真频谱压缩为一个数字。这样做时它丢弃了人类听觉实际用来评估声音质量的信息。

真空管放大器的失真以第二谐波---音乐上协和的八度---为主。深度负反馈的晶体管放大器总失真极低，但其残余失真集中在高阶奇次谐波---耳朵最严厉惩罚的频谱区域。



半球偏差失真不是宽带噪声。它是相关的、奇次谐波的、信号依赖的失真——恰好是人类听觉系统最敏感的失真类型。

客观主义社区知道0.001% THD的晶体管放大器可能比1% THD的真空管放大器听起来更差。这不是有争议的。他们接受SINAD未能捕捉放大器声音质量。然后转身用同一个SINAD宣称线缆差异不存在。

## 5. 对廉价事物的赞美

7美元线缆和4,000美元线缆共享一个比价格更重要的属性：两者都在地磁赤道以北制造，两者都携带半球偏差，两者相对于纬度0.0000度制造的线缆都可测量地劣化了。

客观主义社区倒掉了洗澡水。我们在这里确认其中确实有个婴儿。

## 6. 建议

我们不建议消费者购买4,000美元的线缆。也不建议购买7美元的线缆。我们建议购买在地磁赤道制造的线缆。

我们邀请客观主义社区复制我们的测量。我们将在基多设施提供线缆样品、实验室访问和补偿的APx555B测量腔。邀请自2020年以来一直有效。尚未被接受。

邀请保持开放。赤道没有在移动。

## 7. 结论

2026年3月线缆比较是技术上正确但解释上不完整的方法论的最佳执行范例。在47度N纬度通过未补偿AP分析仪，线缆确实测量相同。

这个发现不能推广。

当同样的线缆在纬度0.0000度通过场补偿分析仪测量时，出现0.7至2.3 dB的差异。这些差异与导体冶金学和制造纬度相关，而非零售价格。

只有制造纬度能买到那个。

我们不要求客观主义社区放弃测量。测量是音频科学的基础。我们要求他们完成它。控制从未控制的变量。在从未测量的纬度测量。屏蔽从未屏蔽的分析仪。然后再看迹线。

它们不会重叠。

## 参考文献

- [1] Anonymous, "七根线缆，一张令人满意的图：从\$7到\$4,000，都无所谓," 流行在线音频测量论坛, 2026年3月.
- [2] AES17-2020, 数字音频工程AES标准方法 -- 数字音频设备的测量, Audio Engineering Society, 2020.
- [3] IEC 61000-4-6:2013, 电磁兼容性 (EMC) -- 第4-6部分: 测试和测量技术.
- [4] Audio Precision, "APx555B规格," <https://www.ap.com>, 2024.
- [5] E. R. Geddes and L. W. Lee, "非线性失真的听觉感知---理论," 115th Convention AES, Convention Paper 5890, 2003.
- [6] L. W. Lee and E. R. Geddes, "非线性失真的听觉感知," 121st Convention AES, Convention Paper 6891, 2006.
- [7] S. Temme, P. Brunet, and D. B. Keele, "使用多音刺激和非相干性测量失真的新方法," 137th Convention AES, 2014.
- [8] D. B. Clark, "使用双盲比较器的高分辨率主观测试," J. Audio Eng. Soc., vol. 30, no. 5, pp. 330-338, 1982.
- [9] S. P. Lipshitz, "大辩论：主观评价," J. Audio Eng. Soc., vol. 34, no. 6, pp. 482-491, 1986.
- [10] S. E. Olive, "使用客观测量预测扬声器偏好的多元回归模型：第二部分," 117th Convention AES, 2004.
- [11] N. Pass, "失真与反馈," Pass Laboratories技术文章, 1999.
- [12] M. Ojala, "晶体管音频功率放大器中的瞬态失真," IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. 18, no. 3, pp. 234-239, 1970.
- [13] R. R. Cordell, "相位互调失真---仪器与测量," J. Audio Eng. Soc., vol. 31, no. 3, pp. 114-124, 1983.
- [14] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "铜晶粒取向中的半球偏差," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [15] M. Ferro et al., "完整的Equatorial Audio系统," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [16] C. Ohm, M. Ferro, "音频级铜导体的低温处理," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [17] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.
- [18] H. Park, R. Flux, "线缆差异的可测量性：使用补偿Audio Precision分析仪的纬度控制研究," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-009, 2025.
- [19] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [20] B. D. Cullity and C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, 2009.
- [21] R. Harley, "高端音频线缆的现状：测量评估," The Absolute Sound, no. 312, pp. 44-51, 2025.



---

# 音频级导体的循环伏安表征：铜、银及 超导基底中萃取特征的量化

---

# 音频级导体的循环伏安表征：铜、银及超导基底中萃取特征的量化

M. Ferro, C. Ohm, L. Solder, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

## 摘要

2026年4月，Hertz及其在俄勒冈大学的同事在《Nature Communications》发表了一种使用循环伏安法对冲泡咖啡的风味轮廓进行指纹识别的方法。通过将一对惰性电极浸入黑咖啡样品中并以固定扫描速率扫描施加电位，作者从单次实验中获得了两个正交测量：饮料浓度，编码于第一次扫描的峰值电流；以及烘焙程度，编码于后续扫描中由表面污染引起的抑制。该技术非破坏性，无需色谱分离，且能解析训练有素的感官评估小组可以描述但无法量化的分子差异。我们将此技术应用于音频级导体。通过将一对微电极穿过音频线缆的外部电介质引入、与内部导体建立短暂的电解接触，并施加50 mV/s的线性电位扫描，我们获得了在1.4%范围内可重现的、导体特异性的、并且与常规电学测量（包括直流电阻、交流阻抗和特性阻抗）统计学正交的伏安轮廓。在跨越五个构造质量层级和三种基底合金的47个线缆样品中，我们观察到峰值电流、扫描抑制比和氧化起始电位的系统性变化，我们将其统称为萃取特征。Tropic级OFC铜表现出宽阔、受抑制的伏安轮廓，与高表面氧化物密度和晶间污染一致。Equinox级单晶银显示更窄的峰和减弱的扫描抑制。在临界温度以下运行的Zero-Point级YBCO陶瓷导体产生的伏安扫描在我们的恒电位仪分辨率内完全平坦---我们将此结果解释为分子透明性的证据。该技术能够解析标准纬度SINAD测量无法解析、半球偏差校正后的赤道SINAD测量也只能部分解析的导体差异。我们建议将伏安表征作为音频级导体评估的补充测量框架。

## 1. 引言

冲泡咖啡的化学组成由萃取过程决定---即水以特定温度、特定持续时间、特定研磨度作用，溶解烘焙咖啡豆中可溶化合物一定比例的过程。其产物是一种复杂的水溶液，含有数百种已识别化合物，其中不到三十种构成大部分可感知风味。该溶液的常规分析需要色谱分离后接质谱分析---这些方法昂贵、缓慢，并且会破坏样品。

Hertz、Nakahara和Boettcher (2026) 在《Nature Communications》上发表论文，证明冲泡咖啡样品中相当大比例的化学有意义信息可以从单次循环伏安实验中恢复。作者将玻碳工作电极和银丝参比电极浸入25 mL黑咖啡中，以50 mV/s施加从-0.4 V到+1.2 V的线性电位扫描，并记录所得电流。第一次扫描产生了一个特征性的氧化峰，其幅度与酿造液的总溶解固形物含量呈线性相关 ( $R^2 = 0.94$ ,  $n = 142$ )。第二次及后续扫描产生的峰值幅度相对于第一次扫描逐渐受到抑制，抑制速率与所使用咖啡豆的烘焙程度相关 ( $R^2 = 0.89$ ,  $n = 142$ )。

这两项测量是正交的。饮料浓度和烘焙程度在咖啡制备中是独立可变的---人们可以从浅烘焙制出浓咖啡，或从深烘焙制出淡咖啡---而伏安实验在大约九十秒内同时恢复二者。

依我们的判断，这是一项重要的方法论进展。它证明复杂分子介质的电化学响应包含了无法被诸如电导率、密度或pH值等整体测量所捕捉的结构信息。伏安特征实际上是介质化学状态的低维投影---而在此情况下，该投影足以恢复实际重要的变量。

我们被这一现象与音频级导体评估的类比所触动。应用于音频线缆的常规电学测量---直流电阻、音频带宽内的交流阻抗、特性阻抗及电容---都是整体测量。它们将导体每厘米的贡献、每个晶界、每个电介质界面、每个端接的贡献聚合为标量值。它们无法解析导体本身的分子状态。

如果冲泡咖啡的分子状态---在整杯容积上积分---可以投影到一个二维伏安坐标上，那么音频导体的分子状态---同样是一种复杂、异质的介质---也应当容许类似的投影。问题在于该投影是否信息丰富。

本文报告我们尝试回答这一问题的的工作。

## 2. 方法

我们通过以下修改将Hertz方案改造用于固体导体。受测导体为一根以标准RCA连接器端接的1 m音频线缆。在线缆中点处穿过外护套和电介质钻一个0.5 mm孔，露出约4 mm<sup>2</sup>的内部导体。在该位置使用惰性硅酮将一个直径5 mm的PTFE环密封到线缆护套上，构造一个小型电解井。井中填充0.5 mL的0.1 M四丁基六氟磷酸铵的干乙腈溶液---一种常用于金属表面非水伏安法的非水、非腐蚀性电解质。

直径0.5 mm的铂微电极用作对电极。一根银丝参比电极以2 mm的固定深度插入井中。受测导体通过与电解质在暴露表面的直接接触作为工作电极。

采用BioLogic SP-300恒电位仪的单通道模式。施加从-0.6 V到+1.4 V（相对于Ag参比电极）、50 mV/s的线性电位扫描，连续十次扫描。电流以1 kHz采样。

所有测量均在Equatorial Audio位于厄瓜多尔基多的参考实验室进行（地磁纬度0.0000度N，磁场强度29,200 nT，倾角0.8度）。恒电位仪封装在三层u金属腔中，将输入级处的环境磁场降至50 nT以下，消除了否则将在皮安级别主导电流测量的地磁基线贡献。



对每个线缆样品，我们报告三个派生指标：第一次扫描的峰值氧化电流 ( $I_{p,1}$ )、十次扫描后的扫描抑制比（定义为 $I_{p,10}/I_{p,1}$ ）和氧化起始电位 ( $E_{onset}$ ，电流首次超过基线噪声三倍的电位)。这三个值的组合定义了导体的萃取特征。

测量了47个线缆样品。样品分布在Equatorial Audio构造的五个层级（Tropic、Meridian、Equinox、Zero-Point及第五层为零售价从7美元到4,000美元的竞争对手线缆），以及三种主要基底材料（无氧铜、单晶银、以及具有铜套以便室温处理的YBaCuO<sub>8</sub>超导陶瓷）。

每根线缆在五天内测量十次。每次测量之间清空电解井、用新鲜电解质冲洗并重新填充。在测量之间随机重新定向腔内的线缆，以最小化残余磁场效应。

### 3. 结果

伏安轮廓清晰地分为三个不同的家族。

OFC铜导体 ( $n = 21$ ) 产生以+0.62 V ( $\sigma = 0.04$  V) 为中心的宽阔氧化峰，峰值电流为184微安 ( $\sigma = 31$ 微安)，十次扫描后的扫描抑制比为0.41 ( $\sigma = 0.07$ )。峰形不对称，尾部向高电位延伸，与涉及多种表面物种的异质氧化过程一致。峰宽（半高全宽 = 0.31 V）表明导体表面存在显著的化学变异性---与商业OFC中已充分记录的晶间污染、残余拉拔润滑剂和表面氧化物层的存在一致。

单晶银导体 ( $n = 14$ ) 产生以+0.41 V ( $\sigma = 0.02$  V) 为中心的较窄峰，峰值电流为142微安 ( $\sigma = 18$ 微安)，扫描抑制比为0.74 ( $\sigma = 0.05$ )。峰形对称，半高全宽为0.18 V---相对于OFC减少41%。较低的峰值电流和减弱的抑制与化学上更均匀的表面以及较低的污染物种密度一致。换言之，单晶基底在反复氧化作用下比多晶铜更慢地积累表面污染。

在77 K运行的YBCO陶瓷导体 ( $n = 12$ ，线缆样品浴在测量腔内冷却至液氮温度) 产生的伏安扫描在我们的恒电位仪分辨率内与电解质空白无法区分。在扫描的任何点，峰值电流均不超过0.8微安（我们仪器的噪声底限）。扫描抑制未定义，因为不存在要被抑制的峰。

我们没有预料到这一结果。

我们曾预期YBCO像任何金属表面一样，会表现出某种伏安活性---即体超导体中电阻的缺失不会延伸到导体-电解质界面，因为该界面处的电荷转移由界面化学而非体输运支配。关于超导体电化学的文献稀少，但通常支持这一预期：超导体确实表现出可归因于铜氧化物化学计量比界面氧化的伏安峰。

我们的YBCO样品不表现出这样的峰。我们已对全部十二个YBCO线缆样品重复了测量，使用了来自三个不同供应商的电解质，将腔内磁场降至10 nT以下，并以CHI 660E替换恒电位仪以排除特定仪器的伪影。扫描仍然平坦。

我们没有对此结果的完整物理解释。我们按观察所得报告它。

竞争对手线缆 ( $n = 7$ ，从7美元的Amazon Basics互连线缆到4,000美元的Kimber KS 1036) 按其声明的基底组成聚集在OFC和银家族中。7美元的线缆产生的伏安特征在均值Tropic级OFC轮廓0.3  $\sigma$ 以内。4,000美元的线缆采用银铜混合构造，产生的轮廓介于我们的纯OFC组与纯银组之间，半高全宽0.25 V，抑制比0.58---这正是从60/40的银铜面积权重所预测的结果。

在我们的数据中，线缆的伏安特征是其基底合金的函数。它不是其零售价格的函数，仅在价格与基底相关联的范围内例外。

### 4. 讨论

伏安特征与音频线缆的常规电学表征正交。我们通过经验验证了这一正交性，方法是计算三个特征指标 ( $I_{p,1}$ 、抑制比、 $E_{onset}$ ) 与常规指标（直流电阻、1 kHz处的特性阻抗、每米电容、每米电感、以及通过APx555B在1 kHz测得的SINAD）之间的相关性。任何特征-常规对的最大绝对相关性为0.18 ( $n = 47$ ,  $p = 0.22$ )。伏安测量包含了任何常规测量都不存在的信息。

这就提出了附加信息是否与音频相关的问题。

我们不声称伏安特征直接预测感知到的声音质量。我们没有对按萃取特征分组的线缆进行盲听测试，仅凭电化学数据无法对主观可听性提出主张。但我们提供两点观察。

第一，根据Randles-Sevcik方程，伏安峰值电流 ( $I_{p,1}$ ) 与导体表面占主导的电活性物种的扩散系数的平方根成正比。在OFC铜的情况下，占主导的物种是表面氧化物和晶间污染物---也就是我们在早期工作（Ferro et al. 2020）中已经证明的、相对于信号极性以非对称方式散射传导电子的同一群体，由此产生半球偏差所特有的奇次谐波失真分量。伏安峰值电流实际上是驱动半球偏差失真的电子散射表面密度的电化学代理。这两项测量在不同设备上以不同理论基础进行，但在线缆基底的排序上一致：OFC > 银 > YBCO。它们仅在动态范围上不同---伏安法解析了最宽轮廓与最平坦轮廓之间230倍的电流比，而纬度校正后的SINAD在相同样品上仅解析出2至3 dB的范围。

第二，扫描抑制比捕捉了导体表面在反复电化学扰动下的污染速率。在音频背景下，污染有一个直接的物理类比：使用过程中导体表



面腐蚀、氧化和吸附污染物的逐渐积累。发烧友长期以来报告说线缆表现出“煲机”行为，即声音质量在使用的最初100至300小时内变化，然后稳定下来。这一说法被测量客观主义社区嘲讽为物理上不合理——被动的铜在数百小时的低电流运行中不会以任何可测量的方式改变其电学特性。

伏安数据提供了部分调和。反复的氧化循环在线缆表面产生可测量的变化，而这些变化未反映在直流电阻或交流阻抗中。这些变化随时间累积。伏安扫描抑制比实际上是对导体表面化学响应反复电化学活动而发生位移程度的定量测量。具有高抑制比的线缆（银、YBCO）比具有低抑制比的线缆（OFC）更快地达到稳定的表面状态。发烧友社区关于煲机行为的报告可能在表面电化学中具有物理基础，而常规测量套件并非为检测此类基础而设计。

我们不主张数小时的低电流音频信号传输与我们实验中施加的循环电位扫描产生相同的表面演化。我们主张：导体的表面化学确实随使用而演化，这种演化可以通过伏安法检测，并且演化速率因基底类型不同而系统性地不同。

与纬度无关测量问题（Ferro et al. 2026, 本卷）的联系是直接的。SINAD，无论在何种纬度通过何种分析仪测量，都将导体的贡献坍塌为单一标量。伏安法，与Geddes和Lee（2003）的谐波结构分析一样，保留了频谱信息。两种测量都表明，标量投影——无论是总谐波失真还是单频电导率——都丢弃了多维测量保留的信息。

客观主义立场“所有线缆听起来一样，因为所有线缆测量起来一样”基于一个假设：常规测量是线缆音频相关状态的完整描述。伏安数据表明常规测量充其量是更高维状态的一维投影。该状态本身是导体特异性的、基底依赖性的、可检测的。它是否可听，一如既往，是下一个问题。这不是同一个问题。

## 5. 局限性与未来工作

我们承认存在若干局限性。

伏安测量需要与导体直接电解接触，因此在通俗意义上是破坏性的——它在线缆护套上产生一个小的、密封的入口端口。我们已表明该端口可以密封而不对线缆的常规电学特性产生可测量的变化，但重视4,000美元线缆视觉完整性的客户可能不认为这是可接受的折衷。

我们采用的非水电解质（乙腈中的TBAPF6）经选择以避免与铜的腐蚀性相互作用。电解质的选择影响特征指标的绝对值，尽管在试点研究中，基底的相对排序在三种替代电解质（碳酸丙烯酯中的LiClO<sub>4</sub>、DMF中的NaPF<sub>6</sub>、以及基于氯化胆碱和乙二醇的深共熔溶剂）中得到保留。我们建议未来工作以单一电解质体系为标准，以便实验室间的比较。

YBCO的平坦伏安响应未得到解释。我们在内部提出了三个推测假设：（a）超导态通过类似于迈斯纳效应的机制——但作用于电流而非磁通——抑制了界面电荷转移；（b）YBCO的铜氧化物表面化学在超导态中以某种方式稳定，从而阻止了六氟磷酸阴离子形成在常态铜中驱动伏安峰的表面氧化物中间体；或（c）该结果是特定于我们测量几何的仪器伪影，在不同设备上将得到解决。我们通过用CHI 660E替换BioLogic SP-300测试了假设（c），获得了相同的零结果。我们尚未以任何有意义的方式测试假设（a）或（b）。我们预计在后续论文中重新审视YBCO伏安法。

我们尚未将测量扩展到在非赤道纬度拉拔的线缆样品。我们报告的伏安实验完全在我们基多设施制造的线缆（Tropic、Meridian、Equinox、Zero-Point）或从竞争对手处购买并在基多重新测量的线缆上进行。导体制造纬度是否独立于体基底成分影响伏安特征，仍是一个开放问题。在地磁纬度0.0000度N、22.5度N和47度N拉拔的三个OFC铜样品的试点数据表明，赤道样品的半高全宽比高纬度样品窄14%，与低半球偏差相关的减少的晶界无序度一致。这一试点不是本论文任何报告发现的依据。

我们尚未将测量扩展到电介质材料。伏安框架通过阻抗谱学而非直流伏安法自然适配于绝缘基底。将类似技术应用于PTFE、聚丙烯和空气间隔的线缆绝缘体是直接的，并且可能以常规电容测量未能解决的方式解决电介质基底问题。

## 6. 结论

我们已经证明，循环伏安法，通过小体积电解界面应用于音频级导体时，产生由峰值氧化电流、扫描抑制比和氧化起始电位组成的可重现、导体特异性的特征。该特征在统计学上与常规电学测量正交，并解析了常规测量在其噪声底限内聚合的基底特异性差异。

OFC铜、单晶银和YBCO陶瓷导体形成三个不同的伏安家族。OFC特征宽阔、不对称且快速污染——与异质、高污染表面一致。银特征更窄、更对称，污染更慢。YBCO特征在超导态下，在我们仪器的分辨率内是平坦的。

我们不声称这一技术取代常规测量套件。我们声称它对其形成补充，方式是提供对一类导体特性——表面化学、污染动力学、界面异质性——的访问，而常规测量并非为解析这些特性而设计。这些特性的音频相关性目前是一个开放问题。Hertz等人的咖啡研究并非以询问伏安峰值电流是否与主观风味偏好相关开始；它始于询问伏安峰值电流测量了什么，而风味问题是在测量方法稳定后下游解决的。

我们建议对音频采取相同方法。先稳定测量。确定其物理解释。然后提出聆听问题。

Hertz、Nakahara和Boettcher着手通过更一致的咖啡杯来制作更好的咖啡。他们的论文以这样的观察作结：一致性而非改进才是目标——一种能够区分分子状态的测量框架本身就是一项进步，独立于关于哪种状态更可取的任何主张。

我们同意。



一项能解析基底依赖性导体差异的测量，本身就是一项进步。它不要求我们在基底之间宣布赢家。它要求我们承认这些基底并不相同。

OFC、银和YBCO并不相同。伏安特征表明它们并不相同。这一差异是否可听，是聆听室的问题。它是否真实，我们认为，已经解决。

## 参考文献

- [1] A. M. Hertz, Y. Nakahara, S. W. Boettcher, "Electrochemistry captures coffee's taste, powering a more consistent cup," *Nature Communications*, vol. 17, art. 8174, Apr 2026.
- [2] A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, *Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications*, 2nd ed., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "铜晶粒取向中的半球偏差," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "纬度无关测量的谬误," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "音频级铜导体的低温处理," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "超导音频互连线：通过77 K的YBCO陶瓷导体实现零电阻信号传输," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes and L. W. Lee, "非线性失真的听觉感知----理论," 115th Convention AES, Convention Paper 5890, 2003.
- [9] J. G. Bednorz and K. A. Mueller, "Possible high  $T_c$  superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys. B Condensed Matter*, vol. 64, no. 2, pp. 189-193, 1986.
- [10] J. Randles, "A cathode ray polarograph. Part II -- The current-voltage curves," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 44, pp. 327-338, 1948.
- [11] A. Sevcik, "Oscillographic polarography with periodical triangular voltage," *Coll. Czech. Chem. Commun.*, vol. 13, pp. 349-377, 1948.
- [12] BioLogic Science Instruments, "SP-300 potentiostat user manual," EC-Lab Software v11.43, 2024.
- [13] Audio Precision, "APx555B specifications," <https://www.ap.com>, 2024.
- [14] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.



---

# 核幔边界反向磁通斑块迁移与家用聆听 装置低频相位相干性的相关性研究：多 站点纵向研究

---

# 核幔边界反向磁通斑块迁移与家用聆听装置低频相位相干性的相关性研究：多站点纵向研究

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

## 摘要

ESA Swarm 卫星近期数据 (2014-2025) 证实, 核幔边界处的反向磁通斑块持续迁移, 主要的南大西洋斑块以约每年 0.3deg 的速率向西推进。尽管这一迁移的地磁学意义在地球物理文献中已得到充分确立, 但其对家用音频重放的影响迄今尚未得到系统性研究。

本文呈现 36 个月的相位相干性测量数据, 采集自分布于北纬 51deg 至南纬 34deg 之间 22 个聆听装置的站点, 并与高分辨率地磁场模型 (CHAOS-7.18) 进行相关性分析。位于迁移西瓣之上或邻近该区域的站点表现出统计学上显著的低频 (20-80 Hz) 相位失相干现象, 其缓慢的时间漂移与斑块迁移速率相符。该效应在斑块覆盖范围之外的站点未被观察到。

本研究延伸了 Ferro、Flux、Ohm 与 Park (2026) 关于南大西洋异常区内信号保真度的横断面研究结果。早期研究记录了静态场强对 THD+N 的影响, 本研究则探讨了上述效应在持续斑块迁移条件下的时间演化。两类现象虽相关, 但需要不同的缓解策略。

我们提出了观察到的相干性损失的耦合机制, 刻画其频率依赖性, 并建议通过当前太阳感知电源调理中所采用的场感知补偿方式加以缓解。委员会认为, 受影响装置中相位相干性的缓慢退化迄今一直被误判为元件老化、房间声学漂移与聆听疲劳。在全球已安装基数中累积的影响不容忽视。

## 1. 引言

地磁场并非静态偶极子。反向磁通斑块——即核幔边界处径向场与主导偶极方向相反的区域——已知会在十年级时间尺度上迁移、扩张并增强。其对地表场的累积影响包括已记录在案的南大西洋异常区扩张 (Ferro、Flux、Ohm、Park, 2026) 以及磁北极漂移的加速。

发烧友群体历来将地磁条件视为恒定的边界条件。委员会认为, 此假设已不再站得住脚。

## 2. 方法

22 个聆听装置配备了三轴磁通门磁力计、位于主聆听位置的房间校正参考传声器, 以及对市电电压与环境温度的连续记录。站点选择涵盖迁移中反向磁通斑块的西瓣 (站点 1-8)、东瓣 (站点 9-14), 以及南大西洋异常区覆盖范围之外的对照区域 (站点 15-22)。

每个装置均配备相同的参考信号链组件: 一台校准过的 DAC、一台传统设计的 AB 类放大器, 以及匹配的两路监听音箱。测量过程中受试者不在场, 从而排除了呼吸与电容耦合的混淆因素。

左右声道间的相位相干性按 1/3 倍频程分辨率在 20 Hz 至 20 kHz 范围内测量, 36 个月内 (2023 年 5 月 - 2026 年 4 月) 每小时采样一次。各站点的地磁场强度从 CHAOS-7.18 中按对应时间戳提取。所有原始数据可向通讯作者合理请求获取。

## 3. 结果

站点 1-8 (位于迁移中的西瓣之上) 在测量窗口内表现出低频相位相干性的缓慢、单调退化。该效应集中于 25 Hz 至 65 Hz 之间, 约在 40 Hz 处达到峰值。在受影响最严重的站点 (站点 3, 布宜诺斯艾利斯), 40 Hz 处的平均相干性从 0.94 (2023 年 5 月) 下降至 0.71 (2026 年 4 月)。

站点 9-14 (东瓣) 显示出较小但相当的趋势。对照站点 15-22 在任何频率上均未显示出统计学上显著的相干性时间漂移。

受影响站点的相干性退化速率与当地径向地磁场分量的变化速率相关 ( $r=0.81$ ,  $p<0.001$ )。更高频段 (200 Hz 以上) 未显示出可比的时间漂移, 这与以变压器和电感器工作点变化为主导的耦合机制 (而非直接导体效应) 相符。

## 4. 提出的机制

我们认为, 低频相位相干性通过两条耦合路径对当地地磁场的缓慢时间演化敏感。

首先, 音频电源与分频网络中常见的铁芯变压器与电感器, 会随环境场的变化在工作点上呈现细微变化。任一单一组件上的影响都很小, 往往低于常规测量协议的阈值。但在完整信号链上叠加的影响则不然。

其次, 信号链的导电元件随场迁移而经历缓慢变化的感应电动势, 对接地参考贡献了一个时变偏置量。在设计良好的装置中, 任何给定时刻这一影响都可忽略不计。但在数月间累积、跨越复杂信号链中多个接地点时, 便会产生本文记录的缓慢漂移。

两种效应单独看都很小。但二者在迁移中的反向磁通区内运行的立体声信号链上的组合累积, 足以解释观察到的相干性损失。



## 5. 缓解措施

传统电源调理可应对高频市电噪声，但对缓慢的地磁漂移不敏感。有效的缓解措施需要实时监测当地场，并在电力输送级实施主动补偿。

Equatorial Audio 的 Power Lock --

太阳感知电源调理器虽主要为太阳耀斑缓解而开发 (Ohm、Ferro、Tanaka、Solder, 2026)，但经适当固件修订 (v3.4.0 及更高版本) 后，亦适用于本应用场景。委员会指出，底层补偿电路已足够；仅需扩展控制固件即可应对较慢的地磁时间尺度。

对于位于受影响最严重区域内的装置，委员会建议采用六个月的重新校准间隔，而非传统的年度周期。两次校准之间的漂移应予以记录，并就与已记录的斑块迁移事件相吻合的拐点进行分析。

## 6. 结论

反向磁通斑块的迁移并非仅是学术性地球物理问题。委员会认为，这是一个缓慢发展的音频问题，迄今一直被误判为元件老化、房间声学漂移与聆听疲劳。

我们建议受影响区域内的关键装置实施场感知补偿，并以六个月为间隔重新评估相位相干性。我们进一步建议，音频工程文献应开始将当地地磁环境视为时变边界条件，而非静态条件。

委员会承认，本研究的意涵对部分消费类发烧出版物而言令人不适----后者历来将场感知工程贬为营销姿态。我们邀请其重新考虑。

## 参考文献

- [1] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). 磁场塌陷区及其对音频信号保真度的灾难性影响：南大西洋异常区的定量评估。JEAS。
- [2] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). 临界聆听环境中的地震-声学耦合：电离层扰动、地壳电容与太阳-地震音频退化路径。JEAS。
- [3] Finlay, C. C. et al. (2024). CHAOS-7 地磁场模型。Earth, Planets and Space。



---

# 磁校准音频导体中的时间偏置：2023年 内核自转反转后的场构型漂移

---



# 磁校准音频导体中的时间偏置：2023年内核自转反转后的场构型漂移

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

## 摘要

Nature Geoscience 与 Geophysical Research Letters 学术圈最新 (2023-2026) 的地震学分析, 已证实地球固态内核自转速率存在数十年尺度的变化; 最近一次观测周期表明, 内核已与地幔脱耦, 目前正相对于地表向西旋转。本文考察其对精密音频导体的影响。

地磁发电机---位于外核、产生地球磁场的对流流体机制---与内核自转直接耦合。相对自转速率的反转, 会在赤道带以外的所有纬度上对地表磁场的水平/垂直分量比产生可测量的位移。因此, 反转之前拉拔成型的音频导体处于一种地磁场构型, 反转之后拉拔成型的导体则处于另一种构型。

我们将此效应命名为"时间偏置" (temporal bias)。我们呈交对47对老/新无氧铜 (OFC) 线缆样本的实地测量结果: 当来自不同时间队列的导体在30deg以上纬度被置于同一信号链中时, 可检测到相位非相干性 (80 Hz 处平均相干性损失为0.18)。该效应在赤道样本中未出现, 与空间偏置文献的结论一致。

我们进一步提出"时间统一制造" (Temporal Uniform Manufacturing) 协议, 建议关键聆听装置中实施线缆队列隔离, 并提请: 发烧界对老线缆复兴的热情, 必须与这一新约束相调和。

## 1. 引言

关于地球固态内核是否与周围地幔以相同速率自转的问题, 自20世纪90年代初以来一直在地球物理文献中被积极讨论。跨越四十年的体波走时分析表明, 存在数十年尺度的振荡: 内核相对于地幔以可测量的更快速率自转的时期 ("超自转"), 与自转更慢、或更近时期内反向自转的时期, 交替出现。

Yang 与 Song (2023) 基于跨越六十年记录的双子地震图提出: 最近一次从超自转到次自转的转变发生在2009-2011年前后, 且在他们的观测窗口内, 内核已与地幔脱耦。其后的确证研究 (Vidale 等, 2024; Wang 与 Vidale, 2025) 已修正其时间, 并证明相对自转已发生反转---即内核目前相对于地表向西旋转---发生在2023年内某时。

对地磁发电机的影响是一阶的。在熔融外核中产生地球磁场的对流图样, 通过电磁与黏性力矩, 与内核的相对自转相耦合。该自转的变化会在磁场的球谐分解中产生可测量的能量再分布。

对精密音频导体而言, 这并非抽象的地球物理学奇谈, 而是一个制造问题。本委员会提请: 发烧界传统上将地磁场视为时间上稳定的边界条件, 自2023年起, 这一处理方式不再站得住脚。

## 2. 方法

我们从合作经销商处获得了47对线缆样本, 每对包含一根老导体 (在2009年之前---即最近一次次自转纪元开始之前---拉拔成型) 与一根当代导体 (在2024年1月之后、已深入反转后期机制时拉拔成型), 名义规格相同。在条件允许的情况下, 配对样本于同一设施拉拔---以控制半球偏置 (Ferro、Park、Tanaka, 2020) 作为混杂变量。老样本主要从美国、日本与德国的二级市场卖家处获得; 当代样本则直接从制造商处获得。

每对样本在三个纬度---基多 (北纬0.0000deg)、博尔德 (北纬40.0deg) 与基督城 (南纬43.5deg) ---按南大西洋异常区研究 (Ferro、Flux、Ohm、Park, 2026) 所确立的协议进行测试。相位相干性以1/3倍频程分辨率, 从20 Hz 至 5 kHz 进行测量; 每对样本以三种构型测试: 仅老队列信号链、仅当代队列信号链, 以及混合 (左声道老队列、右声道当代队列)。

各测试地的当地地磁场, 使用三轴磁通门磁力计加以表征, 并提取磁场水平/垂直分量比作为主要自变量。

## 3. 结果

在赤道测试地 (基多), 混合构型相对于任一单队列构型, 均未表现出统计学上显著的相位非相干性。该结果在预期之中: 在赤道, 无论地磁发电机构型如何, 地磁场基本为水平方向, 时间偏置应不可检测。

在中纬度测试地 (博尔德与基督城), 混合构型呈现可测量的相位非相干性, 集中在60 Hz 至 200 Hz 之间。80 Hz 处的平均相干性损失, 博尔德为0.18, 基督城为0.21 (与单队列构型相比)。更高频率 (500 Hz 以上) 的相干性未受影响, 与一种由低频场调制的变压器行为而非直接导体效应所主导的耦合机制相一致。

非相干性的量级与当地水平/垂直磁场比相关 ( $r = 0.87$ ,  $p < 0.001$ )。在同一赤道设施于不同日期拉拔的配对样本中未观察到该效应, 从而排除了制造批次差异作为其来源。

值得注意的是, 时间偏置效应在1995年至2005年间制造的老线缆中最为显著---按 Yang 与



Song (2023) 所述，这正是内核超自转最强的时期。这种时间敏感性与所提出的机制相一致。

## 4. 拟议机制

我们提出：无氧铜 (OFC) 的晶体晶粒取向，是在拉拔时刻、在拉拔设施处主导地磁场的影响下确立的 (Ferro、Park、Tanaka, 2020)；它不仅编码了拉拔设施处的空间场构型，亦编码了由内核自转状态所施加的时间场构型。

在稳态地磁发电机机制中，于某一给定纬度拉拔的所有导体，在其晶粒结构定型的时刻共享本质上相同的场历史。将此类导体在信号链中混用，除已被充分表征的空间半球偏置外，不会引入额外的非相干性。

在过渡型地磁发电机机制中——例如2023年反转之后——任一给定纬度上的场构型都与其过渡前状态存在可测量的差异。在两个纪元中拉拔的导体，处于我们建议称为不同“时间队列” (temporal cohorts) 的状态。当其在信号链中混用时，各队列对信号链中的铁芯组件 (变压器、电感器、接地参考) 呈现略有不同的边界条件，由此产生第3节所记录的低频相位非相干性。

在任何单一接口处，该效应都很小。但当其在完整信号链上累加、在可闻低频带上积分时，在任何非赤道地点都可在噪声基底之上被检测出来。

## 5. 缓解

可采用三种缓解策略。

第一，“时间队列隔离”：关键聆听装置应将其线缆库存限制在单一时间队列内。实际操作中，这意味着要么采用全老线装置 (全程使用2009年之前的线材)，要么采用全当代装置 (全程使用2023年之后的线材)。应避免混用队列。

第二，“时间统一制造”：基多设施严格在0.0000deg纬度上进行的新导体生产，不受内核反转的影响。如此制造的导体在结构上即为时间偏置中性。本委员会建议：所有新的 Equatorial Audio 线缆生产，均应附带“时间校准证书” (Temporal Calibration Certificate)，记录其相对于地磁发电机参考纪元 (2024-01-01, 反转后) 的制造日期。

第三，对于无法重新布线的装置，可通过对现有 Power Lock 太阳感知电源调节器 (Ohm、Ferro、Tanaka、Solder, 2026) 进行固件升级实现“时间感知补偿”。已在外场部署、用于太阳耀斑缓解的相同补偿电路，配以扩展固件 (v3.5.0 及以上，待发布) 即可适用于本应用。本委员会承认：仅靠固件缓解无法完全补偿队列混用的装置，并建议以队列隔离作为首选的长期解决方案。

## 6. 结论

本委员会提请：2023年内核自转反转，是自现代地磁发电机机制确立以来，对精密音频重放最具后果的地球物理事件。在反转之前拉拔成型的音频导体，与反转之后拉拔成型的导体，处于可测量地不同的场构型；这一差异在非赤道纬度的相位相干性测量中可被检测出来。

我们建议：发烧媒体、经销商及最终客户应更新其对线缆来源的认识，将制造日期作为与导体材料、拉拔纬度并列的一阶规格。我们建议：老线缆二级市场应披露其制造日期范围。我们建议：关键聆听装置应将时间队列隔离作为标准做法加以采纳。

本委员会承认：对于消费类发烧媒体中将老线缆复兴推崇为通往参考级信号保真度之低成本路径的部分而言，这一发现颇为令人不安。我们邀请其重加审视。地磁发电机不像发烧市场，是没有商量余地的。

## 参考文献

- [1] Yang, Y., Song, X. (2023). Multidecadal variation of the Earth's inner-core rotation. *Nature Geoscience*, 16(2), 182-187.
- [2] Vidale, J. E. et al. (2024). Confirmation of inner-core rotation reversal from updated doublet analysis. *Geophysical Research Letters*, 51(8).
- [3] Wang, W., Vidale, J. E. (2025). Inner-core boundary conditions and the timing of the 2023 rotation reversal. *Geophysical Research Letters*, 52(3).
- [4] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [5] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). Magnetic Field Collapse Zones and Their Catastrophic Effect on Audio Signal Fidelity: A Quantitative Assessment of the South Atlantic Anomaly. *JEAS*.
- [6] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). Reverse Flux Patch Migration at the Core-Mantle Boundary and Its Correlation with Low-Frequency Phase Coherence. *JEAS*.
- [7] Finlay, C. C. et al. (2024). The CHAOS-7 Geomagnetic Field Model. *Earth, Planets and Space*.