



---

# 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冶金金的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.