



电机电磁录音及其分析

技术蓝皮书

Rev 1.2

奋斗的苏楠/首席作者

版本日期: 2025.7.21

© 磁拾音器研究所 2023-2025。保留所有权利。

<https://www.mhri.org/>

前言 [zh-cn]

为了系统梳理线圈感应录音技术（磁拾音器技术）的发展脉络、核心原理与实践方法，推动这一小众技术的规范应用与持续迭代，为相关爱好者、研究者提供可参考的技术框架，我们组织编写了这本聚焦电机电磁音捕捉与分析的专业性蓝皮书。

作为一项源于民间实践的技术，线圈感应录音技术在 2013 年前后在日本萌芽，2018 年传入中国后，经国内爱好者的本土化改良与创新，逐步形成了适配国内轨道交通场景的技术体系。然而，长期以来，该技术的研发经验、操作规范及分析方法多散见于网站、个体实践与碎片化分享中，缺乏系统整合。尽管“磁拾音器购买·售后·讨论交流”群等平台为新手提供了问答渠道，群内成员也始终耐心引导，但高频重复的基础问题仍在消耗大量精力，既给新人入门带来阻碍，也限制了技术交流向更深层次推进。随着轨道交通爱好者对电机电磁音的关注度日益提升，对系统、集中的技术指引需求愈发迫切。

本蓝皮书共分为四个主要部分。第一部分追溯技术发展历史，从早期日本的技术雏形，到传入中国后的初步优化、技术深化及普及阶段，清晰呈现关键节点与核心贡献者的探索历程；第二部分阐释基本原理，围绕电磁感应与漏磁现象，解析磁拾音器的工作机制，并对比线圈感应录音与机械走行音在信号源头、传导路径及记录目标上的差异；第三部分聚焦调制分析，介绍异步调制与同步调制的特征及分析方法，揭示技术在评估电机运行状态中的价值；第四部分详述操作方法，涵盖录制前的设备准备、录制中的关键控制节点、后期处理流程及禁忌场景，为实践操作提供具体指引。中文版的附录部分还收录了部分车型的电机驱动程序参考，助力针对性分析。

一、发展历史

电机电磁录音及其分析技术（线圈感应录音技术）是一个针对电机及其驱动程序研发、分析的新兴研究方向，由线圈感应录音器（中国大陆简称磁拾音器）录制的声音被称为“Mo-Ha Radio”，以其精确、干净、特殊的听感吸引了一些轨道交通爱好者。

磁拾音器技术的早期发展历史具有独特的演进轨迹。该技术最早由日本研发者在 2013 年前被发明，由于历史资料缺失等原因，目前尚未能明确其确切的发明时间、发明者及原始技术文献出处。由于传播普及途径不足，2017 年即宣告停产。在 2018 年前，掌握线圈感应录音技术的人群仅限于日本轨道交通爱好者。

2018 年，这项技术迎来了在中国传播与发展的重要转折点。“加特技の肖特基”（B 站 UID: 220243）通过技术分享与实践探索，将线圈感应录音技术引入中国。“大糖果 2”（B 站 UID: 302380924）结合国内实际需求，对原始技术进行初步优化，并在 2021 年发布磁拾音器原型机，利用其完成了上海地铁列车、中国铁路高速列车的录制尝试。他在电路结构设计、元件选型等方面进行调整，使该技术更适用于国内的应用场景，为后续发展奠定基础。B 站 UID 为 18940073 的用户和“CR400AF-B-2116”（B 站 UID: 178648284）是第一批利用磁拾音器进行电机电磁录音的记录人。

2023 年初，技术发展进入新的阶段。B 站业内人士@Chen-Leigang（B 站 UID: 673977755，以下简称 CLG）和@bulbtester2009（B 站 UID: 3461563962886453，以下简称 BT09）等人在前期研究基础上，进一步深化技术改良工作。他们通过改进电路及元件摆放位置，如将外置电池改为内置电池，避免因运输中或频繁拿取、移动造成的线路拉扯损坏，进而增强设备耐用性。同年，集成上述功能的 CLG C2.1 型磁拾音器实现了量产，为后续产品迭代提供样板支持。

2023 年 8 月，首台 CLG 研发的 C2.3 型磁拾音器在广州诞生。C2.3 为目前为止研究所档案记录中销量最高的机型，直到本文档发布之时其本体及衍生机型至少已交付 200 台。该型号首次引入电感线圈弹簧接线端子，提高了磁拾音器的可靠性。同时一些提高倍率的方案应运而生，例如降低电阻实现高倍改装。受限于电路条件，该方案在一代电路上尚不可靠，原因是运算放大器易过载，严重影响收音。

2023 年底，磁拾音器研究人员的讨论 QQ 群成立，标志着技术从民间零散探索迈向组织化开发与研究，为技术规范、迭代提供核心支撑。2024 年初，磁拾音器研究所及购买、技术交流群正式成立，规范了磁拾音器交易和交流的渠道。

2024 年是磁拾音器技术在中国普及的元年。BT09 深耕一代电路技术边界，成功发布首款高倍率机型 B2.5，实现在一代电路框架下达到 26 倍放大上限，完整发挥 NE5532 运算放大器的全部性能。同时电源开关由自锁开关改为拨动开关，进一步降低了故障率。春夏之交，首次电路迭代推出二代电路，首款机型为 CLG 同年 5 月发布的 C2.9 型，但由于故障率高，未投入量产，只生产了 9 台。2024 年 6 月，由@57 路 28585（B 站 UID: 631525725）研发的 SY01 系列成为第一种成功的二代电路机型。相较一代，二代电路实现更高的倍率放大，广泛采用叠层运放提升实用性，大多数集成了锂电池及其充放电控制功能（后成为标配）。5 号电池和纽扣电池（CR2032）也被使用。这些突破推动用户显著增长，使磁拾音器进入车迷视野，加速了技术普及。

2025 年 4 月，@某地铁迷_（B 站 UID: 349435618499235）首次引入级联双运放，推出一代电路性能最强的机型 M2 系列，自带硬件高通、低通滤波器和更高的放大倍率（最高达 2601 倍）。

6 月，磁拾音器研究所官网成立，实现了线圈感应录音技术的购买渠道及其相关的技术资料集中化、权威化传播，助力信息整合与爱好者高效获取设备和资源，推动技术普及与生态凝聚。

随着时间的推移，线圈感应录音技术的发展呈现出多维度的特征。在性能提升方面，不断追求更高的信号放大倍率，以捕捉更微弱的电磁信号；在能源供应方面，持续优化锂电池充电技术，提高设备续航能力，C2L0 型巧妙利用 USB 设备作为电源，减少了电池的消耗；在结构设计方面，致力于电路布局与元件配置的优化，以实现设备的小型化和便携化。

截至目前，线圈感应录音技术仍处于并将长期处于小众爱好阶段，研发和制造（含试制）周期长，灰度测试时间久，短期内极难实现千台规模以上的量产及工业化。这一缺陷需要更多的电路技术爱好者或研究人员添砖加瓦，要在电路设计上创新，增加型号多样性。参与研发制造以保持产量，应对越来越多的火车走行音爱好者日渐增长的需求。

二、基本原理

线圈感应录音技术的主要呈现方式为民间自行制作的各类电感线圈直连或将其与放大电路并联两种。其中，在中国运用最广泛的是基于放大电路的磁拾音器。

大多数中国研发的主流磁拾音器是基于模拟电路研发的，其工作原理基于电磁感应与漏磁现象。列车运行时，牵引变流器等电气设备会产生磁场，由于设备并非完全封闭的磁路，部分磁场会逸出，即漏磁。磁拾音器通常会有电感线圈 4 针插座以接入线圈，其工作核心便是捕捉这些漏磁信号。当牵引变流器的输出产生的交变磁场通过漏磁穿过电感线圈时，依据电磁感应定律，线圈中会产生感应电动势。这个电动势十分微弱，难以被直接捕捉和记录。为此，磁拾音器内部集成了 NE5532 等放大电路。感应电动势经电路处理后，会被放大数十倍甚至数千倍。部分中国制造商通过降低电阻、级联运放等方式实现了 100 倍以上的放大倍率，使得录制机车或强电磁干扰环境的录制成为可能。放大后的电信号被转换为音频信号，通过 3.5mm 音频接口传输至手机等录音设备，在录音设备内部进行模数转换至可听声音。综上所述，磁拾音器将难以直接感知的电磁变化，转化为人耳可听的列车设备运行声音，从而实现对列车运行中电机声音的电磁感应式录制。

线圈感应录音与人类听觉捕捉到的、经空气传导的机械走行音，在信号本质与物理机制上存在显著差异，具体体现在以下三个维度。

信号源头不同。线圈感应录音的核心是捕捉轨道交通车辆电气设备（如牵引变流器）运行时逸出的漏磁信号，这些信号源于电磁交变产生的磁场变化；而机械走行音则来自电机运转、轮轨摩擦、车体振动、部件运转等机械运动引发的空气振动；

传导路径有别。前者通过电磁感应原理，由电感线圈直接感应磁场变化并转化为电信号，无需依赖介质传播；后者则需以空气为介质，通过声波振动传递到人耳或麦克风，其传播过程易受环境噪声、距离等因素影响；

记录目标互补。尽管两者均服务于轨道交通设备运行状态的监测，但线圈感应录音更聚焦电气系统的隐性特征（如变流器调制方式、谐波分布等），而机械走行音则更多反映机械结构的显性状态（如轮对磨损、轴承异响等），二者从不同维度构建了设备运行的“声音画像”，在故障诊断、状态评估中形成功能协同。

三、调制分析

对电磁录音的分析旨在从捕获的信号中提取电气系统（例如牵引变流器）的隐含特征，评估其运行状态，如异步调制频率、同步调制脉冲计数（分频数）或特定的调制方式（如 CHM-PWM、SHE-PWM 和 SVPWM）等。它还能辅助诊断一些牵引故障。这一过程依赖于信号处理技术以及电机电气系统的领域知识，其核心维度包括信号特征提取、运行状态评估和故障预诊断。

在频谱分析方面，通常会使用诸如 Wavetone 和 Adobe Audition 这样的音频分析类软件。其中，Wavetone 的应用较为广泛，尤其是在其波形显示功能方面，而 Adobe Audition 只能进行初步处理。

异步调制

对于异步调制，分析主要依赖于 Wavetone 生成的频谱图。Wavetone 在定位异步调制的载波频率方面发挥着关键作用，这一任务对于理解调制过程的动态特性至关重要。由于异步调制的特点是没有固定的载波频率与调制波频率之间的比例关系，载波频率本身是变化的，准确识别这个频率是剖析调制机制的关键。此外，当与辅助波形图结合使用时，Wavetone 还有助于分析同步调制中的周期数。

Wavetone 所展示的异步调制的频谱图揭示了其独特的特征，这些特征源于载波和调制波的非同步性质。与同步调制不同，在同步调制中，频谱呈现出离散且均匀、连续分布的频率成分，并具有清晰的谐波结构；而在异步调制中，频谱往往显示出更广泛的频率成分分布，伴随着调制度的提高，通常存在一定程度的重叠或扩散。这种模糊效应源于载波与调制波的相对相位持续变化，导致能量在较宽频率范围内分散，而非集中于特定离散点。

Wavetone 这个频谱分析工具能够对这些频率分布进行详细分析。该软件能够显示每个频率成分随时间的变化幅度，或者提供在选定时间窗口内整体频率内容的静态视图。对于异步调制，这使得分析人员能够追踪载波频率如何随着调制波频率的变化而变化，这是异步调制所固有的现象。能够放大特定频率范围并测量频率成

分的强度在这里尤为重要，因为它有助于识别主要频率带以及检测任何可能表明电机电气系统存在异常的意外谐波或互调产物。

同步调制

在同步调制中，载波比（载波频率与调制波频率之间的比例关系）和调制比（调制波幅峰值与载波峰值的比值）在整个操作过程中并非固定不变；相反，它往往具有切换点，使得对波形中波数的计数成为解码调制程序动态调整逻辑的关键手段。这种特性——其中比例在交流周期中变化。例如，一个周期中有 7 个脉冲（同步 7 分频），下一个周期中有 5 个脉冲（同步 5 分频）。

同步调制分析的关键在于对连续的脉冲群进行比较：在正常运行状态下，比率与脉冲之间的变化（例如从 7 个脉冲变为 5 个脉冲）并非突然发生，而是遵循预先设定的逻辑，通常与电机负载或速度的变化相一致。这种转变表现为一个完整的周期，在此周期内脉冲群内的脉冲数量发生变化，而相邻的帧仍保持各自的比率——这种“帧特定比率”就是隐含的切换点。例如，一段数据可能会连续出现 3 个脉冲数均为 7 的脉冲群（第 7 次划分），随后出现一个脉冲数为 5 的脉冲群（5 次划分），然后又恢复为 7 个脉冲的脉冲群，整个过程不会破坏波形的整体连续性。

这些变化通常并非随机发生，除非是列车车轮打滑。它们是经过编程设定的，旨在根据不同的电机转速优化谐波分布：在高负载情况下，可以使用较低的脉冲数（例如广域 3 分频甚至方波）以减少切换损耗，而在轻负载情况下，较高的脉冲数（例如 7 分频）则能提高波形的平滑度。电磁记录能够以极高的精度捕捉这些转变，因为脉冲簇在每一帧内都保持着内部的规律性（脉冲间距均匀、振幅一致），尽管周期与周期之间的比率会发生变化。

值得注意的是，某些转换往往是较为隐晦的——如果没有高保真度的电磁记录以及详细的波形计数，这些变化在机械走行音中就会被掩盖。这就是为什么在同步调制中进行波形计数（重点在于检测隐含的载波比率转换）对于电磁记录分析至关重要：它揭示了电磁记录所依据的调制程序的自适应机制，展示了系统如何通过动态比率调整来平衡性能和效率。

同步调制是电磁记录所要揭示的内容之一，因为它精确地反映了电机驱动系统的控制策略。

四、操作方法

1. 录制前的设备准备与场景评估

列车进站停稳且车门开启后，操作人员携带经电量检查（确保锂电池或一次电池续航满足单次录制需求）、功能测试（线圈无破损、接口无松动）的线圈感应录音设备有序上车。上车后，优先在离牵引变流器及其输出线最近的车厢区域（通常为动力车厢中部）寻找放置点，需满足三项核心条件：

- 空间开阔性：避免被乘客及其行李、座椅靠背遮挡，确保线圈能直接面向变流器漏磁源。如果录制列车（尤其是地铁列车）上乘客较多甚至拥挤，不推荐摆放在地上；
- 安全性：远离车门启闭区域、扶手立柱等易碰撞位置，防止设备滑落或影响乘客通行。如果确实有必要，必须在列车开门时拿走磁拾音器。
- 电磁兼容性：避开手机信号增强器、车载对讲机、高压母线等强电磁干扰源，减少环境噪声对漏磁信号的叠加影响。

2. 设备的布置与参数配置

取出磁拾音器后，需完成如下检查与连接：

- 硬件完整性检查：电感线圈的 4 针插座与连接线是否存在断裂、氧化，自制的线圈绕线是否整齐（松散绕线可能导致感应灵敏度下降）；
- 信号链路连接：通过 3.5mm 音频线将磁拾音器输出端与录音设备（手机、电脑等）输入端连接，插入时需听到“咔哒”声，确保插头金属触点完全接触（松动可能导致信号衰减或断连）；
- 放置姿态校准：磁拾音器需保持水平正向放置（线圈平面与变流器漏磁方向垂直），严禁侧置（线圈平面与漏磁方向平行，感应面积减半）或倒置（内部放大电路受力可能引发接触不良），直接影响漏磁信号的捕捉效率。

录音设备参数设置需遵循“高保真、抗失真”原则：

格式选择：采用 WAV 等无损格式（比特率 $\geq 16\text{bit}$ ，采样率 $\geq 44.1\text{kHz}$ ），避免 MP3 等有损压缩格式导致高频信号丢失或失真；

放大倍率调节：根据车型预设初始值（如 CRH3A-A 型车可设为 20 倍以上），通过试录监听调整。若波形峰值超过 -3dB （软件刻度），需降低倍率防止削波失真；若波形整体低于 -30dB ，需提高倍率以凸显微弱漏磁信号。

3. 录制过程的关键控制节点

列车关门提示音结束后，需立即启动录音，确保完整捕捉牵引变流器启动瞬间的初始调制信号（如 CRH3A-A 在 $0\text{--}7\text{km/h}$ 的 300Hz 异步调制载波频率），这是分析变流器启动逻辑的关键数据。亦方便后续降噪时提供噪声样本。

录制中需重点关注三个动态阶段：

- a. 加速阶段：保持设备静置，因列车加速时牵引变流器处于变频调制状态（如 CRH3A-A 在 $7\text{--}25\text{km/h}$ 区间载波频率从 300Hz 线性升至 450Hz 及其较高速度的同步调制变频），移动设备会引入摩擦噪声，掩盖频率爬升的细节特征；
- b. 匀速阶段：监测信号稳定性，若出现突发尖峰、爆音、超高频（例如交流铁路中分相区间产生的电流电弧放电）或静默，可能是设备接触不良或变流器短时保护。如果有背景噪声，也可能是断电；
- c. 减速与停车阶段：列车停稳后持续录制至少 3 秒，因变流器在制动结束后仍会输出微弱的待机信号，延长录制可完整记录“启动-运行-停止”的全周期电磁特征。

4. 禁忌场景与干扰规避

一般不建议将磁拾音器放置于车外或 15kV 以上的接触网杆侧录制。奥斯特实验表明，通电导线周围和永磁体周围一样都存在磁场，由于接触网电压高，且轨旁设备带来的干扰噪声多以 50 或 60Hz 及其谐波为主，信噪比低，无效谐波量大，后期难以去除。且在车外录音时，漏磁信号微弱且缺乏连续性，因为牵引漏磁已受到严重干扰的影响。

5. 后期处理

音频处理

录音导入电脑后，采用“降噪 - 增益 - 剪辑”三步处理法：

噪声消除：在 Adobe Audition 中选取列车启动前的纯噪声片段（约 $1\text{--}2$ 秒）作为噪声样本，区间越长越应提早启动。通过“效果 > 降噪 / 恢复 > 降噪（处理）”功能，以 $30\text{--}70\%$ 的降噪强度去除环境基底噪声；

信号均衡：使用强制限幅工具将峰值控制在 -3dB 以内，同时通过多段 EQ 提升 $200\text{--}5000\text{Hz}$ 频段（变流器主要调制频率范围），削弱 10kHz 以上的高频和电流干扰；

片段筛选：保留加速、匀速、减速阶段的完整信号，剔除或删除设备移动、突发干扰的片段或频段，最终导出为与视频工程匹配的格式（如 48kHz 采样率的 WAV 文件）。

视频处理

信号可视化与记录：在降噪处理后，使用 Wavetone 或 Sonic Visualizer 生成频谱图，并记录这些视觉内容的连续回放过程，同时捕捉完整的音频。同时，使用工具如 Corrscope 输出波形图，以获得动态波形显示。

编辑软件中的素材整合：将录制的频谱视频、波形视频和降噪后音频导入视频编辑软件。将所有素材的时间轴对齐，以确保音频播放与视觉变化的同步，然后修剪冗余片段，以简化内容。

增强与发布：添加文本注释。视频开头应记录的内容通常包括记录区间（通常位于两个车站之间，或者是一段完整的加速和减速过程）、车厢号。电磁录音章节中，最重要的文本是特定部分的调制分析，这是最有价值的信息。完成后，将视频以合适的格式导出，制作封面（通常为录制列车的外观图片），并发布至视频平台。

注意！

若录制过程中遭遇随车工作人员询问，请配合其完成必要的设备检查，并第一时间说明录制目的为“列车电机声音的个人爱好研究”。如需拆开设备，请遵守磁拾音器制造商提供的用户条款，避免引起不必要的误会或麻烦。

录制过程中严禁触碰列车带电设备或影响列车正常运行。

附录 部分车型的电机驱动程序参考

CRH3A-A 纵横机电 TKD510A/B

速度范围 (km/h)	调制类型	载波频率/调制方式
0-7	异步调制	300Hz
7-25		300-450Hz ↑
25-40		450Hz
40-50	同步调制	同步 11 分频 (CHM-0 折角)
50-62		同步 9 分频 (CHM-0 折角)
62-72		同步 7 分频 (CHM-1 折角)
72-105		同步 5 分频 (CHM-1 折角)
105-120		同步 3 分频 (CHM-0 折角)
120-max		方波

CR400AF 中车时代电气 tPower-TI3

速度范围 (km/h)	调制类型	载波频率/调制方式
0-60	异步调制	458Hz 随机载波
60-110	DTC (直接转矩控制)	六边形磁链直接转矩控制
110-120	同步调制	同步 7 分频 (中间 60 度)
120-135		同步 5 分频 (中间 60 度)
135-170		同步 3 分频 (中间 60 度)
170-max		方波

上海地铁 3 号线 03A01 型列车 阿尔斯通 ONIX1500

速度范围 (km/h)	调制类型	载波频率/调制方式
0-10	异步调制	300Hz
10-17	同步调制	同步 21 分频
17-25		同步 15 分频
25-37		同步 11 分频 (SHE)
37-41		同步 7 分频 (SHE)
41-47		同步 5 分频 (SHE)
47-53		广域同步 3 分频
53-max		方波

版本历史 [zh-cn]

Rev 1.2 – 25 July 2025 UTC 05:50

- 修正了可能存在的歧义和知识性错误。
- 发展历史中新增磁拾音器研究所和部分开发者的标志性事件。
- 修正机翻可能导致的用词错误。
- 增写了一些必要的细节。
- 调整排版。

Rev 1.1 – 21 Jul 2025 UTC 16:53

- 进行一些必要的缩写处理，以便表述和阅读。
- 新增了第三章，主要讲述了分析相关内容。
- 分点内容适当缩进。
- 适当增删内容。

Rev 1.0 – 18 Jul 2025 UTC 16:46

《电机电磁线圈感应录音及其分析技术白皮书》是磁拾音器研究所出品的第一篇磁拾音器技术及运用技术类文章 (Rev 1.0)，首次发布于 2025 年 7 月 18 日 (协调世界时)，依托研究所成员的经验，系统归纳和汇总磁拾音器技术的起源-原理-操作全链路。文章涵盖技术发展历史、核心原理与基础操作方法。文档包含英语版本。