



电机电磁录音及其分析

Rev 1.5

技术蓝皮书

磁拾音器研究所知识委员会 编

磁拾音器研究所知识委员会

主 编 奋斗的苏楠

副 主 编 高坂筑穗 T2801

编写人员 bulbtester2009

美术编辑 高坂筑穗

责任编辑 奋斗的苏楠

前言 [zh-cn]

为系统梳理线圈感应录音技术（亦称磁拾音器技术）的发展历程、核心原理与实践方法，推动这一小众技术走向规范化、系统化，并为广大爱好者、研究者提供清晰可靠的技术指引，我们编写了本蓝皮书。

该技术起源于日本民间的早期实践，约 2013 年初见雏形，2018 年传入中国后，经国内爱好者的持续探索与改良，逐渐发展出适用于本土轨道交通场景的完整技术体系。然而，长期以来，相关知识与经验多分散于网络帖文、个体实践与即时通讯群的碎片化交流中，缺乏系统整合。尽管已有爱好者组织通过社群进行答疑与分享，但基础问题反复出现，不仅消耗社群精力，也阻碍了技术的深入交流与迭代。随着轨道交通爱好者对电机电磁音的关注日益增长，一份系统、可靠、易于获取的技术参考显得尤为迫切。

本蓝皮书共分为四个部分。第一部分回顾线圈感应录音技术从日本萌芽到在中国落地、优化、普及的全过程，梳理关键节点、重要人物与技术突破，呈现一项小众技术如何通过爱好者接力逐步形成生态的生动历程。第二部分深入阐释磁拾音器工作的物理基础，解析信号从磁场到音频的完整转换链条，并厘清电磁录音与机械走行音在信号源、传播方式与分析目标上的根本区别，帮助读者建立清晰的技术认知框架。第三部分聚焦于电磁录音的核心价值，状态诊断与特征解析。系统介绍异步调制与同步调制的典型特征、识别方法与分析意义，并结合实例说明如何通过频谱解读牵引变流器的工作策略与运行状态，展现技术在电机健康监测与故障预判方面的潜力，适合专业技术人员和具备一定知识储备的人群阅读。第四部分为操作指南，提供从设备与物料准备、场地选择、参数设置到录制技巧、后期处理的全流程实操指引，特别针对常见错误、线材选择与禁忌场景给出明确建议，旨在降低入门门槛，提升录制成功率与信号质量，让爱好者能够规范、安全、有效地开展实践。

我们对这本书向所有 VVVF、电磁录音、走行音爱好者的普及寄予厚望。它不仅仅是一份技术文档，更是一份由无数深夜调试、车厢蹲守与频谱分析凝结而成的社群记忆与集体智慧。我们将其献给每一位为研究轨道交通牵引电机而驻足、为捕捉到一段清晰的调制波形而欣喜的探索者。

目 录

一、发展历史	3
二、基本原理	4
2.1 磁拾音器的核心用途	4
2.2 电路整体架构与核心工作逻辑	4
2.3 综述	5
三、调制分析	5
3.1 异步调制	5
3.2 同步调制	7
3.3 多电平调制和三电平逆变器	9
3.4 异步调制的载波频率和听感的关系	11
四、操作指南	12
附录 1 部分车型的电机驱动程序参考	15
附录 2 中英文术语和缩写对照表	16
版本历史 [zh-cn]	0

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。2021 年，他基于 Mo-Ha Inductor 技术改良的第一代磁拾音器原型机发布，标志着线圈感应录音技术完成了在中国的第一次实际尝试，并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。“大糖果 2”在电路结构设计、元件选型等方面进行调整，使该技术和产品设计理念更适用于国内的应用场景，为后续发展奠定了坚实的基础。不久之后，[@hdfhfgjgvjghhkjjihghhg](#) 和 [@CR400AF-B-2116](#) (B 站 UID: 178648284) 成为已知的第一批利用磁拾音器进行电机电磁录音的爱好者。

2023 年初，技术发展进入新的阶段。B 站业内人士 [@Chen-Leiqang](#) (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）。

同年 6 月，[磁拾音器研究所官网](#) 成立，标志着线圈感应录音技术发展历程中的一个制度性里程碑。该平台不仅构建了规范化的设备流通渠道，更重要的是，它首次实现了与该项技术相关的核心文献、操作规范及分析方法的系统性聚合与权威性发布。这一举措从根本上改变了此前技术资料离散于个体实践与即时通讯工具的局面，初步搭建起一个结构化的公共知识框架。

官网的建立，其核心价值在于通过信息熵的降低来提升生态系统的整体效能。它将碎片化的“信息资源”整合为可检索、可迭代的“知识资产”，显著降低了爱好者获取核心设备与关键技术资料的时间与认知成本。这种“渠道-资源”一体化平台的建立，不仅加速了技术本身在爱好者社群中的渗透与普及，更通过提供共同的参照系与对话基础，为原本松散的个体兴趣者群体注入了形成有机共同体的潜在可能，从而在技术普及之外，开启了生态文化凝聚与延续的新阶段。

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。BT09 的 B2.8P 系列就使用了全新的三明治结构，将设备的体积减小到仅一个蓝牙耳机充电盒的大小，可将其置于口袋中，增强了设备运用的灵活性和隐蔽性。

截至目前，磁拾音器产业仍处于并将长期处于小众爱好阶段，其本质是一个依托即时通讯工具组建的“网络化项目研发共同体”，呈现出“虚拟化协作”与“分布式作坊”并存的形态。尽管已建立用于知识沉淀与产业展示的官方网站，但其实际运营重心偏向内部的硬件序列管理，公共知识库（如录音位置）尚处于停滞状态。这揭示了该产业链生态的核心矛盾：磁拾音器产业的协作能量高度集中于“项目化推进”与“硬件确权”，缺乏对“公共知识体系”进行持续构建与维护的集体自觉。这种模式虽带来了敏捷的迭代能力，却也使产业在形式上“去中心化”的同时，于关键资源与产能上形成“再中心化”依赖，导致知识管理与生产流程难以系统化。最终，整个生态的韧性与其脆弱性并存，发展上限始终受限于核心个人的能动性与社群的短期活力。

二、基本原理

2.1 磁拾音器的核心用途

磁拾音器的核心用途是捕捉列车牵引系统工作时辐射的交变漏磁，通过电路将无形的电磁动态转化为可听辨、可分析的电信号，最终为解析牵引变流器的调制策略、评估其运行状态及诊断潜在电气故障提供数据支撑。其电路的核心原理，是将微伏至毫伏级的微弱感应信号，通过稳定、低噪声的处理，转化为满足录音设备输入要求的标准电信号，同时适配列车复杂的电磁环境与移动使用场景。



图 2-1 一台标准的磁拾音器外观

2.2 电路整体架构与核心工作逻辑

磁拾音器本质上是一种模拟放大电路。遵循“电磁信号捕捉→信号提纯→幅值放大→稳定供电→标准输出”的核心链路，以 NE5532P 为唯一运算放大核心，通过模块化协同实现信号的全流程处理，各环节紧密围绕“精准提取电磁信号、抑制干扰、保障信号保真度”展开。

a) 电磁信号的捕捉

磁拾音器的前端传感部分可感知列车牵引变流器等大功率电气设备工作时产生的交变漏磁。当这些磁场的磁力线穿过传感部件时，依据电磁感应原理，会转化为微弱的交变电信号。该信号是反映牵引系统电气状态（如调制模式、开关频率）的原始载体，但幅值极小，且混杂着环境中的工频干扰、杂波等冗余成分，无法直接被录音设备识别，需进入后续电路处理。

b) 信号的提纯

原始微弱电信号首先经过预处理环节，该环节的核心作用是过滤掉与目标电磁信号无关的干扰成分。通过特定的电路设计，阻断低频工频干扰和高频杂波的传输，仅允许线圈接收到的频率信号通过，从而提升信号的纯净度（信噪比），为后续放大环节奠定基础，避免电路中干扰信号被同步放大后影响分析结果。

c) 幅值放大

信号提纯后,进入以 NE5532P 为核心的多级放大环节。这是电路实现信号可记录的关键步骤。NE5532P 作为低噪声运算放大器,具备稳定的线性放大特性,其核心任务是将预处理后的微弱电信号,通过多级协同放大逻辑,线性提升至伏特级的标准电平。

该放大过程严格保持信号的原始特征(如频率变化、相位关系),不产生额外畸变,最终输出的信号幅值能够匹配录音设备(手机、录音笔、电脑声卡)的输入灵敏度要求,确保牵引系统的电磁动态特征被完整捕捉。结合实际应用需求,通过电路参数匹配,NE5532P 可实现数十至数千倍的稳定增益,完全覆盖不同列车牵引变流器的信号放大需求。

d) 稳定供电与安全保障

电路配备独立的供电控制环节,通过开关组件实现供电的通断控制,降低误触导致的故障风险。同时,设计有过压、过流保护逻辑,能够应对列车环境中可能出现的电压波动或突发浪涌,避免核心放大部件(NE5532P)受损,保障设备在频繁移动、电磁环境复杂的车载场景中稳定工作,延长使用寿命。

e) 标准输出:信号的传输与记录

经 NE5532P 放大后的标准电信号,通过 CITA 标准音频接口与线缆传输至录音设备。接口通常使用 3.5mm TRS 或 TRRS 音频接口,确保与主流录音终端兼容,信号传输过程中保持稳定,无明显衰减。录音设备通过内置的模数转换(ADC)功能,将连续的模拟电信号转化为数字音频格式(如 WAV),完成“磁场→电信号→数字音频”的完整转化,最终生成可用于后续调制分析、状态评估的核心数据。

2.3 综述

磁拾音器通过电路的协同工作,本质上实现了“无形电磁信号→有形可分析数据”的转化。其中,NE5532P 作为核心放大部件,承担了信号幅值提升的关键使命,配合预处理、供电保障、标准输出等环节,确保了牵引系统电磁特征的精准捕捉。最终产出的数字音频,能够反映牵引变流器的调制模式、开关频率等核心参数,为后续的运行状态评估、潜在故障诊断提供了可靠的数据源,这也是磁拾音器的核心应用价值所在。

三、调制分析

我们对电磁录音所记录的信号进行调制分析的目的在于,从捕获的时域磁场信号中解析出牵引电气系统,尤其是牵引变流器的调制程序特征,进而对其运行状态进行量化评估与潜在故障诊断。这一分析过程通常依赖于专业的信号处理算法与电机控制领域的先验知识,其核心在于提取并辨识关键调制参数——例如异步调制下的载波频率、同步调制下的脉冲计数(载波比)以及具体的调制策略(如 CHM-PWM、SHE-PWM 或 SVPWM)等。这些参数共同构成了评估变流器工作状态、效率乃至异常的重要依据。

要完整描述一个调制程序,首先需界定其输出的基本目标:即期望电机获得的电压的基波频率,它直接决定了电机的同步转速。然而,变流器并非直接输出平滑的正弦波,而是通过高速开关的脉冲序列来等效这一波形。这就引出了第二个关键参数——载波频率,它代表了功率器件本身的开关动作速度。载波频率(f_c)与基波频率(f_m)的比值,称为载波比或分频数(N),它是区分不同调制模式的首要判据。此外,输出电压的幅值控制由调制度(Modulation Index)决定,其定义为调制波幅值与载波幅值之比。下文将聚焦于轨道交通电磁录音中最常见的两类调制模式——异步调制与同步调制,以及三电平的有关概念,分别阐述其特征、分析方法与工程意义。

3.1 异步调制

异步调制(Asynchronous Modulation)是指载波频率(Carrier Frequency, f_c)与基波调制频率(Fundamental Frequency, f_m)之间不存在固定的整数比例关系(即载波比 $N=f_c/f_m$ 不为常数)的调制方法。这意味着载波的每个周期与调制波的相位关系是持续、非周期性地变化的。这种调制方式常见于很多牵引变流器中,其频谱特征与同步调制有显著区别。对异步调制的分析,核心在于通过频谱图观察其能量分布特征。使用频谱分析软件(如 Wavetone、Sonic Visualiser)生成的频谱图是完成这一任务的关键工具。

能量分布的连续与扩散性是异步调制最显著的视觉特征。由于载波与调制波的相位关系不断变化，其频谱不再是离散、清晰的单一谱线。相反，主要能量会以一个相对较高的载波频率（例如数 kHz）为中心，向两侧扩散形成一个连续的频带或“谱块”。这个频带内部可能看起来较为模糊或粗糙，不像同步调制那样呈现为一条条尖锐、等间隔的谱线。

载波频率的定位是理解该段异步调制程序的关键。在该扩散的频带中心，通常可以观察到一个能量相对集中的峰值区域，这大致对应了平均载波频率。通过放大频谱图的频率轴并测量该峰值区域的中心，可以估算出变流器在此运行状态下的主要开关频率。需要注意的是，这个频率值可能随着负载、速度、程序等运行条件的改变而发生变化。

异步调制根据其载波频率的时变特性，可分为多种具有不同声学特性与电气特性的策略，其中相当一部分专为优化电机（特别是牵引电机）在起步或低速运行时的噪声与振动性能而设计。异步调制的基本形态为恒定载波，即载波频率在运行中某一程序阶段保持某一固定值，在频谱图上表现为一个位置稳定、能量集中的主频带。关于恒定频率载波调制的频谱图如图 3-1 所示。

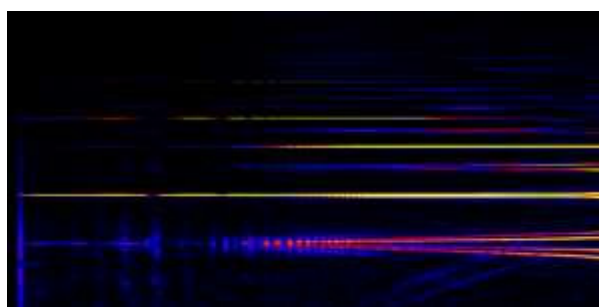


图 3-1 恒频载波异步调制频谱图

对异步调制载波频率的识别，其更深层的意义在于判断变流器所采用的具体载波类型。在实际生产运营中，为降低特定频段的电磁噪声，降低沿线居民降噪诉求，尤其是可闻声频段（如开关频率及其谐波）的单调啸叫声，衍生出以下几种主要的异步调制变体。以下从四个常用的调制变体进行论述。

3.1.1 随机载波调制

随机载波调制是一种载波频率在一个设定的中心值附近进行短间隔的随机跳变的异步调制方法。在频谱图上，原本尖锐的单一载波谱峰会因此扩展为一个以中心频率为核、两侧带有宽而连续基底的谱块，核心尚可辨，但边缘较为模糊，能量被分散到更宽的频带内，从而降低了特定频率的噪声突出度。关于随机载波调制的频谱图如图 3-2 所示。此调制变体在时代电气研发的牵引变流器中较为常见。

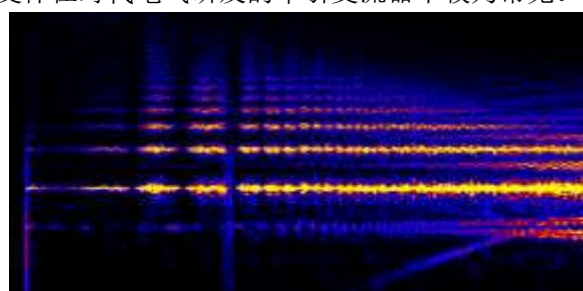


图 3-2 随机载波异步调制频谱图

3.1.2 周期载波调制

周期载波调制是一种载波频率以一个远低于其自身的次周期（例如几十赫兹）进行规律性的周期性扫频的异步调制方法。这在频谱图上会呈现出一个低频（扫频速率）调制的清晰图案，载波主频带会随着该周期规律性地在频率轴上左右移动或强度周期性起伏。关于周期载波调制的频谱图如图 3-3 所示。

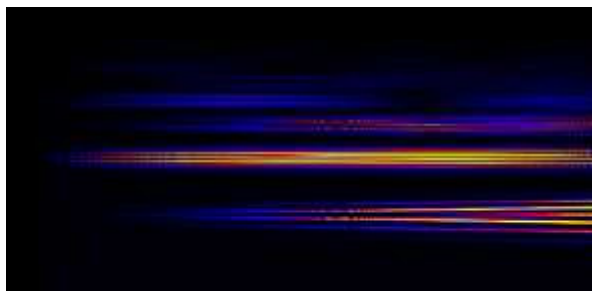


图 3-3 周期载波异步调制频谱图

3.1.3 随机摆动载波调制

随机摆动载波调制可视为随机与周期调制的结合。载波频率不仅随机变化，其变化的中心值或范围本身也随时间缓慢、随机地摆动。其频谱特征更为复杂，主能量带更宽、更弥散，且可能没有稳定的中心峰值，呈现为一片起伏不定的连续频谱。关于随机摆动载波调制的频谱图如图 3-4 所示。

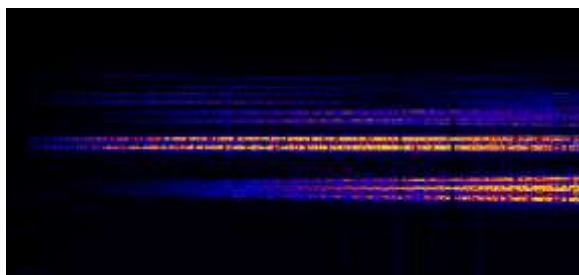


图 3-4 随机摆动载波异步调制频谱图

3.1.4 交替载波调制

交替载波调制是牵引系统在两个或更多个预设的固定载波频率之间进行周期性切换的异步调制方法。在频谱图上会表现为多个离散的、位置固定的载波谱峰并存，其能量随时间在主峰之间交替转移。这同样能将能量分配到不同频点，避免单频噪声持续。关于交替载波调制的频谱图如图 3-5 所示。

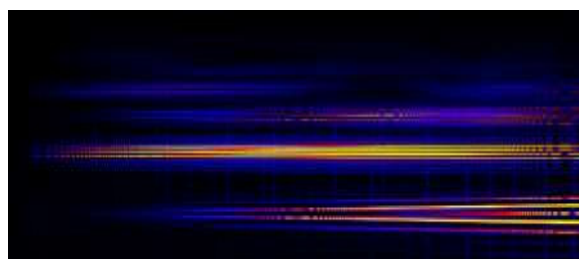


图 3-5 交替载波异步调制频谱图

某些情况下，这段电磁录音信号还可以为部分低速段的输出进行异常检测。分析人员通过观察频谱图，可以识别出异常谐波或互调产物。这些异常可能表现为在预期频带之外出现孤立的、突出的谱峰，或者频谱整体形状出现畸变（如不对称、频率不对、额外的凸起或不该存在的噪音），这些都可能预示着电机或变流器存在早期电气故障（如元件老化、参数失衡、控制异常等）。

另外，我们在录音时常常遇到从零起转的工况。运行中通常有两种通电方式，都是在电机已建立旋转磁场和反电动势的基础上进行的，其核心差异在于电流变化的突然性。我们通常将运行中通电分为两种方式：顺序通电与恒流通电。在顺序通电中，系统会按照预置的程序序列，在一两秒内顺序切换调制方法，调制度往往从较低值快速步进提升至目标值；而恒流通电通常采用恒流控制，调制度从较低的电流和调制度开始，随着电流逐步增加，直至达到该转速下程序设定的稳态调制度与基波频率匹配点。

3.2 同步调制

同步调制（Synchronous Modulation）特指一种载波频率与基波调制频保持严格固定整数比（即载波比 $N = f_c / f_m$ 为常数）的脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）技术。其核心原理在于，通过将固定高频的载波

（通常是三角波或锯齿波）与一个低频的期望波形（调制波，如正弦波）进行比较，生成一系列宽度随时间变化的脉冲序列。由于载波与基波频率同步，脉冲序列在每一个基波周期内都呈现完全重复的对称模式。这种严格的周期性使其输出频谱具有高度确定性，谐波能量通常仅分布在载波频率的整数倍及其边等离散频率点上，而不会像异步调制那样形成连续谱带。这种特性非常有利于进行精确的谐波分析与预测性设计。

以下将详细介绍几种重要的同步脉宽调制技术。

3.2.1 SPWM（正弦脉宽调制）

正弦脉宽调制（**Sinusoidal Pulse Width Modulation**）是最基础、应用最广泛的 PWM 技术之一。其核心原理是：以频率远高于正弦调制波的三角波作为载波，通过直接比较两者瞬时值来生成 PWM 脉冲。当正弦波瞬时值高于三角波时，输出高电平脉冲；反之则输出低电平。这样产生的脉冲宽度在一个基波周期内严格按正弦规律变化，经过滤波后即可得到平滑的正弦波输出。SPWM 主要有两种实现方式：

单极性调制：在正弦波的半个周期内，载波和生成的 PWM 脉冲均为单极性（全为正或全为负）。

双极性调制：在整个周期内，载波和 PWM 脉冲均在正负电平之间切换。目前大多数轨道交通牵引变流器采用这种形式。

其优点是原理直观，易于实现，能有效减少低次谐波。但主要缺点是直流母线电压利用率较低，理论上最大输出线电压幅值仅为直流母线电压的约 86.6%。



图 3-6 同步调制 15 分频的线电压波形

3.2.2 SVPWM（空间矢量脉宽调制）

空间矢量脉宽调制（**Space Vector Pulse Width Modulation**）是一种先进的调制策略，它从电机产生圆形旋转磁场的需求出发，其控制思想不再局限于对单相波形的模仿。

其原理基于逆变器八种可能的开关状态（6 个有效矢量，2 个零矢量），对应八个基本的电压空间矢量。SVPWM 的核心算法是矢量合成：在每个控制周期内，通过计算选择相邻的两个有效电压矢量和一个零矢量，按特定时间顺序和时长进行组合，以合成任意方向和幅值的目标电压矢量。通过这种方式，可以使逆变器输出的电压矢量轨迹尽可能接近理想的圆形。

与 SPWM 相比，SVPWM 在相同直流母线电压下，输出线电压幅值可比 SPWM 提高约 15%。SVPWM 的电流波形谐波含量更少，转矩脉动更低。其控制算法非常适合现代微处理器或 DSP 执行。

3.2.3 SHE-PWM（特定谐波消除脉宽调制）

特定谐波消除脉宽调制（**Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation**）是一种以消除指定低次谐波为直接目标的优化 PWM 技术。它不依赖载波比较，而是通过直接计算并优化开关器件的导通与关断时刻（开关角）来实现。

其原理基于傅里叶级数分析。通过建立方程组，在保证基波电压幅值达到要求的前提下，令指定次谐波（如 5 次、7 次、11 次）的幅值为零。求解这些非线性方程组，即可得到一组最优的开关角度。采用这些角度控制的 PWM 波形，可以完全消除预先选定的低次谐波，从而显著改善输出波形质量，并允许使用更小尺寸的输出滤波器。

SHEPWM 的优点是波形质量高、效率高，特别适用于中高压、大功率且对谐波有严格限制的场合。其挑战在于开关角的计算复杂，且通常只在基波频率固定的同步调制方式下使用。



图 3-7 同步调制 11 分频 (SHEPWM) 的线电压波形

3.2.4 CHM-PWM (电流谐波最小化脉宽调制)

电流谐波最小化脉宽调制 (Current Harmonic Minimization Pulse Width Modulation) 是 SHEPWM 思想的一种延伸和优化。其目标并非完全消除某几次谐波,而是追求在全球上使输出电流的谐波总畸变率最小化,或者使特定频段的谐波能量总和最小。

与 SHEPWM 固定消除某几次谐波不同,CHMPWM 通过更复杂的优化算法 (如迭代法、梯度下降法等) 在线或离线计算开关角,以动态适应不同的工作条件 (如调制比变化),实现电流波形质量的整体最优。这使其在追求低噪声、低损耗的高性能电机驱动系统中具有应用价值。



图 3-8 同步调制 7 分频 (CHMPWM-1 折角) 的线电压波形

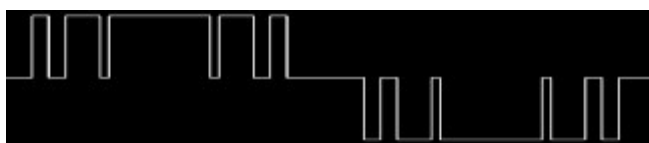


图 3-9 同步调制 5 分频 (CHMPWM-1 折角) 的线电压波形

3.2.5 中间 60° 调制

中间 60° 调制 (Central 60° Modulation), 有时也称中间折角调制, 是一种特定形式的同步优化调制, 是在低开关频率大功率牵引应用 (如电力机车、动车组) 中, 为解决传统 SPWM 谐波性能劣化问题而发展的一种改良型同步调制策略。其“中间 60°”指将每个基波周期的 PWM 脉冲 (即开关动作) 集中控制在以波形峰值为中心的 60° 开关角度区间内, 在此区域外则保持恒定高或低电平。这一设计源于对逆变器输出电压谐波的分析, 发现在中间区域集中开关, 能更有效地消除或大幅抑制特定的低次谐波分量。

其核心优点在于, 在相同的低载波比 (如 5 或 7) 下, 其输出电压的谐波含量显著低于传统 180°SPWM, 从而改善电机电流波形、降低损耗和噪声。同时, 其脉冲分布规则比 CHMPWM 等优化算法更简单, 易于实现。主要缺点是, 其谐波抑制性能属于“局部优化”, 通常针对特定次谐波 (如 5、7 次), 在最小化总谐波畸变方面不如 CHM-PWM 等全局优化算法彻底。因此, 它常被视为从传统 SPWM 向更复杂优化调制过渡的实用方案。



图 3-10 同步调制 5 分频 (中间 60 度) 的线电压波形

3.3 多电平调制和三电平逆变器

在对同步调制与异步调制进行系统阐述后, 我们需要将分析的维度, 从控制信号的策略层面, 下沉到实现这些策略的物理硬件层面。理解“电平”这一基础概念, 是解读现代高性能牵引变流器电磁特征的关键前提。

3.3.1 两电平的局限性和三电平的诞生

在本蓝皮书所聚焦的语境下, “电平”并非泛指电压的高低, 而是特指电压源型逆变器单相桥臂输出端, 相对于直流母线公共参考点 (通常为母线电容中点或负端) 所能呈现出的、离散的、稳定的电压状态数量。

我们可以通过两电平逆变器 (2-Level Inverter) 的拓扑来具体化这一概念。两电平的每个桥臂由上下两个开关器件 (如 IGBT) 构成。工作时, 同一桥臂的上下管互补导通。当上管导通、下管关断时, 输出端被“钳位”至正直流母线电位 (记为 $+U_{dc}/2$ 或 P 电平); 当下管导通、上管关断时, 输出端被“钳位”至负直流母线电位

(记为 $-U_{dc}/2$ 或 N 电平)。因此,其输出电压波形如同在一个两级台阶(“高”与“低”)之间做陡峭的切换,电压变化率($\Delta U/\Delta t$)极高,产生的谐波频谱宽且能量集中。这种两电平结构是早期逆变技术的基础,但其在向高压、大功率、低噪声场景拓展时,遇到了物理层面的根本性限制:单个功率器件的耐压能力有限,而陡峭的电压跳变会引发强烈的电磁干扰和电机绝缘应力。

为了解决这些瓶颈,电力电子学界开始探索在输出端创造更多电压阶梯的可能性,“多电平”逆变器的概念应运而生。其中,三电平拓扑(3-Level Topography)是最早实现且应用最广泛的多电平解决方案。

三电平变流器的核心思想,是在输出端引入除正(P)、负(N)之外的第三个电压状态——零电平(O)。其标志性拓扑“中点钳位型”(Neutral Point Clamped, NPC)变流器,由日本学者赤木泰文(Y. Akagi)与南波江章(A. Nabae)等人在1980年的IEEE工业应用协会年会上首次提出。这一结构通过在传统两电平桥臂中增加一对钳位二极管,将直流母线电容的中点电位引至桥臂中点,从而允许输出端在正(P)、零(O)、负(N)三个电平之间切换。三电平的诞生,就是为了使器件的串联分压与中点钳位,每个主开关器件在关断时仅承受一半的母线电压;另一方面,将输出电压的变化率降低了约50%,显著减小了对电机绝缘的冲击和由此辐射出的高频电磁干扰。三电平输出电压的阶梯更密,更逼近正弦波,其谐波频谱中低频段的谐波含量显著降低,这在牵引电机驱动的可闻噪声抑制和滤波器小型化方面具有巨大价值。

3.3.2 三电平的信号特点

三电平逆变器的输出则引入了“零电平”作为中间态。其输出电压在正、零、负三个电平间切换,每次开关动作的最大电压阶跃幅值降至 $U_{dc}/2$,仅为两电平的一半。这使得输出波形从两电平的“方波”形态变为更精细的“多阶梯波”形态。反映到电磁信号上,这一变化带来了两个直接影响。

第一是谐波频谱得到优化。输出电压的阶梯增多,能更逼近正弦波,从而显著降低输出波形中的低次谐波含量。这意味着一部分谐波能量从低频段转移或减小,使得电机运行更平稳,电磁噪声中的“粗糙感”降低。

第二是开关频率谐波更加分散,电压变化率的降低,直接减小了由开关动作本身激发的高频辐射。更重要的是,如一些分析指出,三电平PWM方法能够“把第一组谐波分布带移至2倍开关频率的频带区”。这相当于在频谱上,主要的谐波能量“簇”被推向更高频率。对于电机绕组电感而言,抑制这些更高频率的谐波电流更容易,这进一步改善了系统的整体电磁兼容性。

因此,从分析角度看,一段来自三电平变流器的电磁录音,其背景噪声可能更“干净”,特定开关频率的谱线尖锐度可能因谐波簇的扩散而有所减弱,整体谐波分布可能呈现出与两电平不同的结构。

3.3.3 三电平的极性

三电平变流器在调制策略上的灵活性,直接塑造了其输出波形的不同“听感”特征。这主要体现在对“单极性”与“双极性”两种调制方式的选择上。

单极性调制是最能发挥三电平优势的模式。其规则是:在调制波(正弦波)的正半周,输出电压仅在正电平(P)和零电平(O)之间切换;在负半周,仅在负电平(N)和零电平(O)之间切换。从波形上看,这避免了正负电平的直接跳变。每次开关动作造成的电压变化率幅值仅为 U_{dc} 的一半。这种“半步走”的方式,使得输出谐波频谱中,由开关引入的高次谐波能量更少,且分布频带更宽、幅度更低。反映在听感上,单极性调制产生的电磁音通常背景更“干净”,高频的“毛刺感”或“嘶嘶声”较弱,整体显得较为平滑。

双极性调制更接近传统两电平的行为。它在调制波的整个周期内,输出电压都可能包含正(P)、零(O)、负(N)三种电平的任意组合。这意味着在一个开关周期内,输出可能会在P和N之间直接跨越,产生幅值为 U_{dc} 的全电压阶跃。尽管由于存在零电平,其开关模式仍比两电平复杂,但相比单极性模式,其输出电压的变化更为剧烈。这会导致频谱中特定频率的谐波分量相对集中,能量更高。

在分析实践中,一个有趣的现象是:当一台采用三电平拓扑的变流器运行于载波频率为1kHz的异步调制,且调制波形正负半周对称(可等效为占空比50%)时,其录制的电磁音在主观听感上,基频往往像是2kHz,即“翻了一倍”。这种听觉上的“倍频”现象,其根源在于波形的对称性和人耳的感知特性。当调制波为正负对称的波形(如方波或特定占空比的PWM波)时,其理论频谱中只包含奇次谐波。也就是说,1kHz的基频(一

次谐波)分量是客观存在的。然而,人耳并非完美的频谱仪,其对音高的感知是心理声学过程。

首先,当 1kHz 的奇次谐波序列(1k, 3k, 5k, 7k Hz...)同时存在且强度可观时,人脑会倾向于感知其中最低的、有规律的共同基频。但由于只有奇次谐波,这个“规律”的基频间隔实际上是 2kHz。2kHz 是所有这些奇次谐波的一个“公约周期”。其次,在特定条件下,例如当 1kHz 的基波分量本身因调制策略或录制滤波被一定削弱,而 3kHz、5kHz 等谐波相对较强时,人耳更容易丢失对原始 1kHz 基频的锁定,转而被 2kHz 的间隔规律所主导。三电平变流器在双极性调制或某些优化模式下,其输出波形可能恰好强化了这种谐波结构。

因此,这种“听起来像 2kHz”的感觉,是实际存在的 1kHz 奇次谐波序列作用于人耳听觉系统后产生的主观音高感知。这是电磁录音分析中一个典型的例子,提醒我们频谱图上的客观频率与耳朵听到的主观音高有时并不完全一致,需要结合波形对称性和谐波构成进行综合判断。这一现象在两电平变流器中也可能出现,但在三电平的特定调制下可能更为典型。

3.3.4 三电平和广域 3 分频

“广域 3 分频”通常指在较宽的同步调制调速范围内,持续使用分频数 $N=3$ 的同步调制模式。在这种极端的载波比下,每个脉冲的宽度(占空比)必须在一个基波周期内从极窄变化到极宽。对于需要生成零电平(O 状态)的三电平逆变器而言,问题随之产生。

要输出零电平,三电平桥臂中的某对特定开关管必须导通。生成一个非常窄的有效脉冲(无论是 P 还是 N),往往意味着其相邻的零电平(O 状态)脉冲的持续时间会更短。这个过短的 O 状态脉冲,其持续时间可能无法满足功率器可靠开通与关断所需的最短时间,即低于控制器或驱动器所允许的“最小脉宽”。如果强行生成,会导致开关管未充分导通即被关断,引起波形畸变、损耗剧增,甚至器件损坏。因此,对于三电平逆变器,在低调制比(输出电压较低)的区域, $N=3$ 的同步调制往往因无法产生满足最小脉宽要求的零电平脉冲而无法实施。这是其拓扑结构带来的一个固有运行边界。

相比之下,两电平逆变器在 $N=3$ 时,虽然脉冲同样很窄,但其每个状态(P 或 N)都只涉及简单的上下管互补动作,不涉及第三电平的生成,因此对极窄脉冲的耐受能力更强。只要脉冲宽度在物理上能驱动开关管动作,理论上就可以实现。这使得两电平变流器在较高速度、需要低输出电压时,仍能采用“广域 3 分频”策略,而三电平则通常需要在速度(或输出电压)升高到一定程度,脉冲宽度足够容纳可靠的零电平时,才能切入 $N=3$ 的同步调制模式。

这种差异是硬件拓扑决定调制边界的典型例证。在分析电磁录音、识别调制策略时,若发现在低速段存在清晰、稳定的三分频同步调制特征,这通常是两电平变流器的一个有力指征;而对于三电平变流器,在对应的低速区间更可能观察到的是异步调制或其他较高载波比的同步调制模式。

3.4 异步调制的载波频率和听感的关系

异步调制模式下,人耳感知到的声波频率始终是变流器标称载波频率的 2 倍(如标称 500Hz 载波对应 1000Hz 听感),这一现象的根源是变流器的开关动作机制与电力电子器件特性,与磁拾音器无关,完全遵循电力电子与电磁振动的量化规律。

两电平变流器是异步调制的典型应用场景,其输出电压仅存在正、负两种电平状态,而完成“正电平→负电平”或“负电平→正电平”的一次完整电平切换,即 1 个载波周期,必须依赖上下桥臂功率开关器件(IGBT 或 GTO)的两次互补开关动作。根据互补 PWM 控制原理,上下桥臂的开关管需始终保持逻辑反相状态,当一个桥臂导通时,另一个必须关断,且为避免直通短路,切换过程中会设置短暂死区时间。以 500Hz 载波为例,其周期为 2ms,意味着每秒将完成 500 次电平切换,对应 1000 次开关动作,即开关频率为 1000Hz,这一频率直接决定了后续声学信号的核心频率。

人耳的听感本质是开关动作引发的电磁-机械-声学转化结果。变流器每秒 1000 次的开关动作会产生同频率的交变电磁力,根据麦克斯韦应力张量理论,该电磁力作用于电机定子铁心,激发定子结构产生 1000Hz 的机械振动。这种振动通过空气介质辐射为声波,其频率与开关动作频率完全一致,恰好落在人耳敏感的 20Hz-20kHz 音频范围内,因此人耳感知到的是 1000Hz 声波。

需要明确的是,载波频率是变流器电平切换的周期频率,反映的是电平状态重复的时间间隔;而听感频率

对应的是开关器件的动作频率，反映的是每秒开关状态变化的次数，两者的 2 倍关系是两电平变流器拓扑与互补 PWM 控制的必然结果。因此，绝不能仅凭听感判断异步调制的载波频率，必须通过频谱分析定位能量最集中的载波频率中心，结合开关动作与载波周期的量化关系，才能准确识别变流器的实际载波参数。

四、操作指南

4.1 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）通过监听耳机的输出结果地毯式寻找放置点。为保证录制效果和成功率，放置地点需满足三项核心条件：

- 空间开阔性：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。如果确实有必要在车门附近放置，必须在列车到站开门时拿走磁拾音器，以免使内部元件受压。
- 电磁兼容性：尽可能避开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。

4.2 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，如果使用自制的线圈，需检查绕线是否整齐（松散绕线可能导致感应灵敏度下降）；
- 信号链路连接（关键步骤）：**这是新手最易出错、导致无法正常录音的核心环节。**

请严格遵循以下说明：

1. 理解接口。

标准磁拾音器中用于输出原始音频的接口为 3.5mm TRRS¹ 四段式音频接口（接点定义：尖端-左声道，环 1-右声道，环 2-接地，基座-麦克风/信号线）。部分型号可能采用 TRS 三段式接口（接点定义：尖端-左/单声道信号，环-右声道/接地，基座-接地）。制造商有义务在产品规格中明确标注接口类型，请在选购时仔细核对。

2. 选购专用线材。

若为了连接手机，您必须购买一条至少 2 米长的“3.5mm TRS/TRRS 公头 转 USB-C/Lighting 公头”的专用音频转接线（适用于安卓/苹果手机）或“3.5mm TRRS 公头 转 3.5mm TRS 公头”的音频线（适用于带麦克风输入口的电脑声卡）。严禁使用手机充电线或不匹配/有降噪功能的转接头，它们因引脚定义不同将导致信号无法传输或者极大降低音频质量。若为了连接 3.5mm 音频接口的设备，通常使用一条 3.5mm TRRS 音频线即可。大多数专用录音设备的接口是 TRS 接口，如果您的输出设备没有 TRRS 接口，则必须购买一条 TRS 转 TRRS 的音频线。

3. 正确连接。将磁拾音器的 3.5mm 音频输出口与另一端 3.5mm 音频输入口或专用转接线的 TRS/TRRS 公头牢固连接（听到“咔哒”声），再将转接线的另一端接入录音设备的对应端口。

常见错误：若录音设备无声或仅有微弱杂音，或者听到降噪后的声音，90%以上的原因是使用了错误的线材。请立即检查线材型号，并更换为上述专用转接线。

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 $\geq 48\text{kHz}$ ），避免 MP3、M4A 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（如干扰大的列车可设为 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 -20dB，需大幅提高倍率以凸显微弱漏磁信号。

¹ 关于 CTIA 与 OMTP 标准的说明：TRRS 接口存在两种广泛存在的引脚标准：CTIA（左-右-地-麦）与 OMTP（左-右-麦-地）。区别在于后两个接点（接地 GND 与麦克风 MIC）的顺序互换。磁拾音器普遍采用 CTIA 标准。若误用为 OMTP 标准设计的线材（常见于部分老旧耳机），将导致信号回路断开，无法正常录音。连接前，请务必确认线材标准与设备匹配。

4.3 录制过程的关键控制节点

列车关门提示音结束后，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 0-7km/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 7-25km/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。若信号出现突发高频爆音，可能为外部电气干扰（如过分相电弧、浪涌电流）。若信号呈现规律性背景噪声后突然调制比下降、规律衰减至本底噪声，对应手柄回零、牵引系统断电。若信号在正常规律中整体完全静默或跳变，则可能是磁拾音器接触不良或变流器触发短时保护。
- c. 减速与停车阶段：列车停稳后持续录制至少 3 秒，因变流器在制动完全施加后仍会输出微弱的待机信号才能切断，延长录制可完整记录“启动-运行-停止”的全周期电磁特征。

4.4 禁忌场景与干扰规避

一般不建议将磁拾音器放置于车外、15kV 及以上高压接触网杆侧或距离牵引变流器过远的位置进行录制。其核心原因在于电磁环境的严重劣化。

奥斯特实验证实，通电导线周围存在磁场。高压接触网、钢轨及其旁的供电设备（如变压器、回流线）构成了一个高强度、以 50Hz/60Hz 工频及其高次谐波为主导的干扰场。在此环境下，目标信号（通常为数百至数千赫兹的目标牵引调制谐波）被完全淹没，极大削弱了信噪比，无效谐波分量巨大，后期处理几乎无法分离有效信息。同时，随着距离变流器增加，漏磁信号本身呈指数级衰减，其微弱性与不连续性使得有效捕捉变得异常困难。

必须承认，存在于机车后第一节车厢录制的成功实践。这通常依赖于数万倍以上的超高增益、极其精准的线圈定位以及对现场干扰源的深刻理解。然而，此类操作对设备性能、操作者经验及环境偶然性的要求极高，本质上是在极限条件下对抗物理规律，其可重复性与普适性不高，获得的信号质量与稳定性通常低于在变流器正下方或车体内部的直接录制。因此，对于绝大多数应用场景与操作者而言，上述区域仍应被视为需要规避的“禁忌场景”。

为了追求清晰、稳定的电磁录音，首选的、最可靠的策略永远是尽可能靠近信号源（牵引变流器），并尽可能远离已知的强干扰场。

4.5 后期处理

音频处理

录音导入电脑后，采用“降噪 - 增益 - 剪辑”三步法则处理数据。

噪声消除：在 Adobe Audition 中选取列车启动前的纯噪声片段（约为总音频长度的 1%~3%）作为噪声样本，区间越长越应提早开始录音。通过“效果 > 降噪 / 恢复 > 降噪（处理）”功能，依据不同环境的干扰情况，去除环境基底噪声；

信号均衡：使用增幅工具提升音频响度，并使用强制限幅工具将峰值控制在 -3dB 以内。

片段筛选：保留加速、匀速、减速阶段的连续完整信号，最终导出为与视频工程匹配的格式（如 48kHz 采样率的 WAV 文件）。中间长期匀速部分可酌情考虑是否删除

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，并使用录屏软件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精确到帧对齐，以确保音频播放与视觉变化的同步，然后修剪冗余无输出的片段，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。展示电磁录音的章节中，最重要的文本是特定部分的调制分析。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”。如需拆开设备应对检查，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 1 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 1 号线 01A05 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

附录 2 中英文术语和缩写对照表

A

中文	English	缩写/Abbreviation
交变电流	Alternating Current	AC
数模转换器	Analog to Digital Converter	ADC
异步调制	Asynchronous Modulation	Async
自动列车运行系统	Automatic Train Operation	ATO
自动列车保护系统	Automatic Train Protection	ATP
自动列车监控系统	Automatic Train Supervision	ATS
辅助变流器	Auxiliary Converter	——
辅助电源	Auxiliary Power Supply	APS

C

中文	English	缩写/Abbreviation
架空接触网	Catenary	——
斩波器	Chopper	——
线圈	Coil	——
通讯式列车控制	Communication-Based Train Control	CBTC
电流谐波最小脉冲宽度调制	Current Harmonic Minimum Pulse-Width Modulation	CHMPWM

D

中文	English	缩写/Abbreviation
数模转换器	Digital to Analog Converter	DAC
双极性	Dipolar	——
直接转矩控制	Direct Torque Control	DTC
直接自控制	Direct Self Control	DSC
数字信号处理	Digital Signal Processing	DSP
非连续脉宽调制	Discontinuous Pulse-Width Modulation	DPWM

F

中文	English	缩写/Abbreviation
快速傅里叶变换	Fast Fourier Transform	FFT
磁场定向控制	Field-Oriented Control	FOC
频率	Frequency	f
基频	Fundamental Frequency	——

G

中文	English	缩写/Abbreviation
门极可关断晶闸管	Gate Turn-Off Thyristor	GTO

H

中文	English	缩写/Abbreviation
谐波	Harmonics	——
高频注入	High-Frequency Injection	HFI
高压隔离开关	High-Voltage Disconnecter	HVD
高压电流互感器	High-Voltage Transformer	HVPT
滞环	Hysteresis	——

I

中文	English	缩写/Abbreviation
绝缘栅双极晶体管	Insulated Gate Bipolar Transistor	IGBT
变流器/逆变器	Inverter	——
电感器	Inductor	——
电感量	Inductance	——

M

中文	English	缩写/Abbreviation
主断路器	Main Circuit Breaker	MCB
金属氧化物半导体场效应管	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	MOSFET
调制	Modulation	——
电动机调制度	Modulation Index	——
电动机	Motor	——

O

中文	English	缩写/Abbreviation
运算放大器	Operational Amplifier	——
架空接触网	Overhead Line	OHE

P

中文	English	缩写/Abbreviation
受电弓	Pantograph	——
永磁同步电机	Permanent Magnet Synchronous Motor	PMSM

续表

相位	Phase	——
脉冲	Pulse	——
脉冲宽度调制	Pulse With Modulation	PWM

R

中文	English	缩写/Abbreviation
整流器	Rectifier	——
电阻	Resistance	——
纹波	Ripple	——
转子	Rotor	——

S

中文	English	缩写/Abbreviation
采样率	Sampling Rate	——
碳化硅金属氧化物半导体场效应管	SiC Carborundum Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	SiC-MOSFET
可控硅晶闸管	Silicon Controllable Rectifier	SCR
半导体	Semiconductor	——
传感器	Sensor	——
特定谐波	Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation	SHEPWM
信号	Signal	——
信噪比	Signal-Noise Ratio	SNR
正弦脉宽调制	Sinusoidal Pulse Width Modulation	SPWM
空间矢量脉宽调制	Space Vector Pulse Width Modulation	SVPWM
频谱	Spectrum	——
鼠笼式异步电机	Squirrel Cage Induction Motor	SCIM
开关频率	Switching Frequency	——
同步调制	Synchronous Modulation	——

T

中文	English	缩写/Abbreviation
总谐波失真	Total Harmonic Distortion	——
转矩	Torque	——
牵引变流器	Traction Converter	——
晶体管	Transistor	——
三极电子管	Triode	——

U

中文	English	缩写/Abbreviation
单极性	Unipolar	——

V

中文	English	缩写/Abbreviation
可变电压可变频率/ 变频调速系统	Variable Voltage Variable Frequency	VVVF
变频器	Variable Frequency Drive	VFD
电压	Voltage	——

W

中文	English	缩写/Abbreviation
波形	Waveform	——
绕组	Winding	——

版本历史 [zh-cn]

Rev 1.5 – Sat Jan 3 2026 UTC 09:03 [Update]

- 更改封面，优化文档大小以便于分发。
- 修正了第三章第四节的严重学术错误。
- 将文档编号统一为 X.X 格式以便于查阅。

Rev 1.4 – Sat Dec 8 2025 UTC 01:00 [Update]

- 大幅新增第三章中三电平的有关表述，补充调制度、载波和基波的概念。
- 修改前言，增加封底。
- 修复打印时可能导致的装订线和排版错误、页码位置。

Rev 1.3b – Sat Dec 6 2025 UTC 16:30 [Patch]

- 修改个别词语消除歧义。
- 新增中英文术语对照表。

Rev 1.3a – Fri Dec 5 2025 UTC 17:30 [Patch]

- 为第三章增加波形示例配图。
- 新增关于 TRRS 标准的注释。
- 简化第二章中的冗长文本。

Rev 1.3 – Thu Dec 4 2025 UTC 18:23 [Update]

- 改写并强化了产业形态总结，突出了虚拟化协作与平台化尝试的核心矛盾。
- 大幅增补了异步调制、同步调制技术原理与对比分析。
- 在操作方法中特别强调并扩充了 3.5mm 接口转接线的关键作用与选购要求。
- 在禁忌场景论述中加入“车外第一节车厢超高倍率录制”的极限案例并阐明其性质。
- 全文统一并优化了部分术语表述和逻辑衔接。
- 新增交互式目录。

Rev 1.2 – Fri July 25 2025 UTC 05:50 [Update]

- 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。
- 新增了一些必要的细节。
- 调整排版。

Rev 1.1 – Mon Jul 21 2025 UTC 16:53 [Update]

- 将文档性质更改为“蓝皮书”。
- 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。
- 适当增删冗余内容。

Rev 1.0 – Fri Jul 18 2025 UTC 16:46 [Initial Release]

《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。