

变频空调EMI分析整改方法及实例

邓 平, 刘俊锋

四川长虹空调有限公司技术部, 四川 绵阳

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年3月26日; 发布日期: 2025年6月9日

摘 要

变频空调电磁兼容性(EMC)一直以来是产品设计开发周期中的主要节点。随着变频空调控制器设计呈现功能多元化、高频小型化、功率密度增大趋势, 各种电子部件使用越来越多, 使得变频空调EMC分析整改越发困难。其中, 如何快速高效鉴别出变频空调电磁干扰(EMI)类别成分, 并采取对应措施是解决问题的关键。本文结合作者对一款家用变频空调产品EMI的分析整改实例对分析整改方法进行论述。该方法对空调EMI干扰成分定位分析整改, 具有可行性。

关键词

EMI, 空调, 差模干扰, 共模干扰

EMI Analysis and Rectification Methods for Variable Frequency Air Conditioner with Case Studies

Ping Deng, Junfeng Liu

Technical Department, Sichuan Changhong Air Conditioning Co., Ltd., Mianyang Sichuan

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Mar. 26th, 2025; published: Jun. 9th, 2025

Abstract

Electromagnetic compatibility (EMC) of variable frequency air conditioners has always been a critical aspect in the product design and development cycle. With the design of variable-frequency air conditioner controllers trending toward multi-functional features, high-frequency miniaturization, and increased power density, the growing use of various electronic components has made EMC analysis and rectification increasingly challenging. A key challenge lies in quickly and efficiently identifying the categories and components of electromagnetic interference (EMI) in variable frequency

air conditioners and implementing corresponding corrective measures. This paper combines the author's practical case study of EMI analysis and rectification for a household variable frequency air conditioner to discuss the methodology. The proposed approach demonstrates feasibility in locating, analyzing, and resolving EMI interference components in air conditioners.

Keywords

EMI, Air Conditioner, Differential-Mode Interference, Common-Mode Interference

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着空调设计功能多元化, 各种电子部件集成使用, 特别是空调控制器中高压、高频功率器件(如 IGBT、IPM)的应用, 器件的高频开通和关断, 形成了高的 dv/dt 和 di/dt [1], 导致其电磁干扰(EMI)呈现低频差模/共模叠加、高频辐射耦合复杂化的趋势, 空调控制器的电磁兼容(EMC)设计整改越发困难, 周期变长。若对空调控制器的 EMI 具体干扰成分分析定位, 将有助于快速解决空调 EMI 问题。EMI 有传导干扰和辐射干扰两种。传导干扰主要是电子设备产生的干扰信号通过导电介质或公共电源线互相产生干扰; 传导干扰又分为共模干扰和差模干扰。辐射干扰是指电子设备产生的干扰信号通过空间耦合把干扰信号传给另一个电网络或电子设备。对于传导干扰, 若缺少相关的分离工具, 则只能根据频率大致区分共模、差模干扰: 0.15~0.5 MHz, 差模干扰为主; 0.5~5 MHz, 差模、共模干扰共存; 5~30 MHz, 共模干扰为主[2]。现有研究虽对传导干扰分离方法有所探讨, 然而 EMC 实验室通常没有差共模分离设备, 不能及时确定干扰类型, 沿用以往干扰分布经验, 可能会加长空调 EMC 的解决时间。确定传导干扰的类型后使用对应的滤波方案将可以快速解决空调的 EMC 问题。本文主要从传导干扰的定位分析入手, 结合整改实例进行探讨说明。

2. 空调传导干扰的构成

被测设备传导干扰发射的路径有两种可能: 一种是为被测设备供电的两根导线分别作为往返线传输干扰, 这种路径干扰称之为差模干扰; 另一种为两根电源线为干扰传输曲线, 分布电容和接地平板为干扰提供返回路径, 这种称之为共模干扰[3]。对于空调器, 存在内外机控制器, 特别是家用空调器, 室内外共用一个供电插头, 其传导干扰包括了内外机控制器的干扰叠加。

3. 空调 EMI 干扰的分析整改思路

对于家用空调器, 如何快速定位干扰源以及干扰具体成分, 是解决问题的第一步。

3.1. 干扰源定位

本文采用分模块隔离法进行内外机分离测试, 本次实验空调室外机供电是通过内机继电器开关控制。当整机 EMI 超标时, 通过单独运行内机送风模式, 不对外机供电。以此断开外机运行干扰来初步确定干扰来源。

值得注意的是, 干扰源定位的准确性高度依赖于测试环境的标准化。例如, 实验室的接地阻抗、屏蔽室性能以及测试设备的校准状态均可能影响结果的可重复性。在实际操作中, 建议采用多组对比实验:

在相同工况下分别测试内机独立运行、外机独立运行(通过外接电源供电)以及整机联动状态下的 EMI 频谱, 通过频谱叠加分析明确干扰贡献比例。

3.2. 滤波策略设计

对于传导干扰中的差模干扰, 通常有增大 X 电容或增加差模电感进行滤波的方法; 对于传导干扰中的共模干扰, 通常采取增加共模电感、Y 电容、磁环等方式进行滤波。同时内部布线、走线等也是 EMI 的有效手段, 为了消除空调变频压缩机的空间耦合辐射, 需要将电源线的线路远离变频压缩机等辐射源 [4]。合理设计装置和系统的结构、布局 and 布线, 对改善装置的 EMC 起着决定性的作用 [5]。对于干扰更大的变频室外机, 磁环在电源线上的位置同样也是影响整机 EMC 测试结果的较大影响因素。

X 电容与 Y 电容的选择需综合考虑耐压等级、容值频率特性及安装位置。X 电容(跨接在 L-N 线间)主要抑制差模干扰, 其容值增大会降低截止频率。Y 电容(跨接在 L/GND 或 N/GND 间)针对共模干扰, 需注意漏电流安全限值, 容值过大会增加对地泄漏电流, 可能引发触电风险。因此, 设计中需平衡 EMC 性能与安规要求。

4. 空调 EMI 问题的整改实例

要产生 EMC 问题, 需要有三个要素: 干扰源、耦合途径、敏感设备。空调 EMC 问题, 可以通过排查干扰类型, 通过针对该类型干扰的耦合路径优化、干扰源屏蔽或远离、隔离等措施来解决。在进行一款空调 EMC 测试时出现了传导干扰超标及辐射干扰余量较低的问题。

4.1. 传导干扰排查及整改

整机原始状态: 150~600 kHz 频段传导干扰超标见图 1。

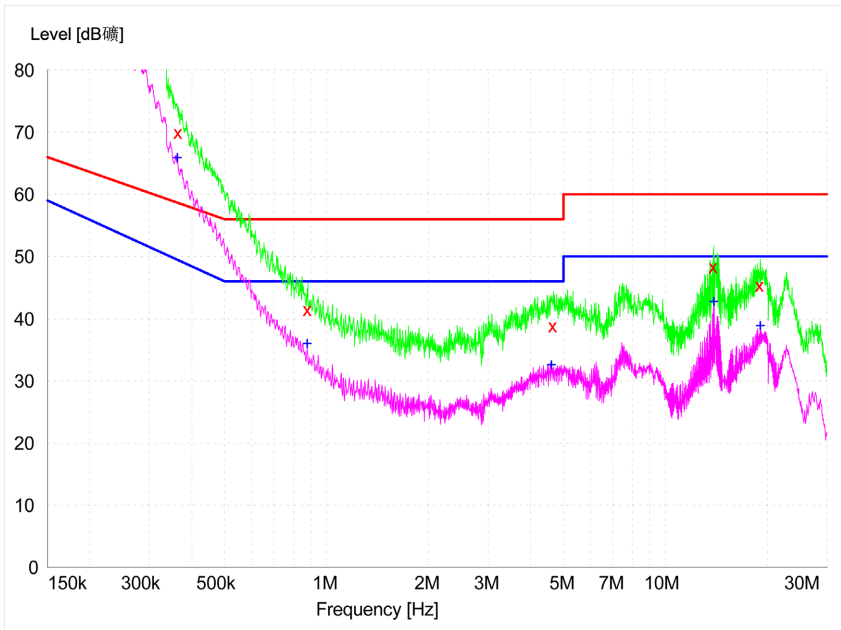


Figure 1. Original conducted disturbance of the entire machine

图 1. 整机原始状态传导干扰

首先采用分模块隔离法, 将内外机干扰区分, 内机开送风功能时, 室内机不对室外供电, 完全排除室外控制器的传导 EMI 叠加影响。内机开送风测试结果见图 2:

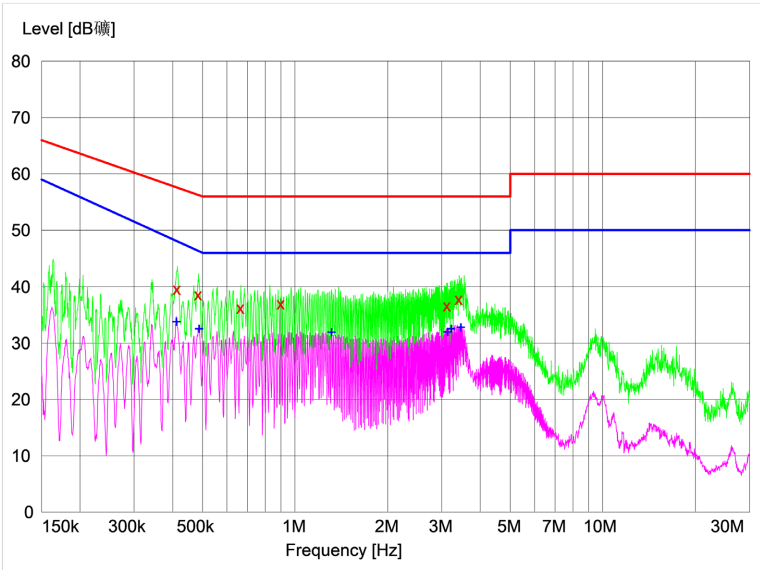


Figure 2. Conducted interference of indoor unit air supply function
图 2. 内机送风功能传导干扰

内机余量足够,判断本次测试超标的干扰主要由外机引起。通过图 1 测试发现在 150~600 KHz 左右,准峰值及均值均超标。空调电源端对电网的影响,对低于 1 MHz 左右频段的,一般为差模干扰,可通过绕磁环或加差模电感的方法来解决[6]。如果 0.15~0.5 MHz 频段不达标可以加强差模的抑制,方法是增加 Cx 的容量[7]。参照上述分析,判断本次样机超标频率点干扰主要为差模干扰,增大滤波电路中的 X 电容,该频段传导干扰无明显改善。

由此进一步判断由于空调器存在较大电流的功率器件开关,对于大多数电气产品适用的传导干扰频段分布特性,对空调器不适用,空调器在 0.15~0.5 MHz 差模干扰与共模干扰也是共存。调整共模滤波电感设计,增大共模电感 0.15~5 MHz 范围阻抗,测试结果见图 3:

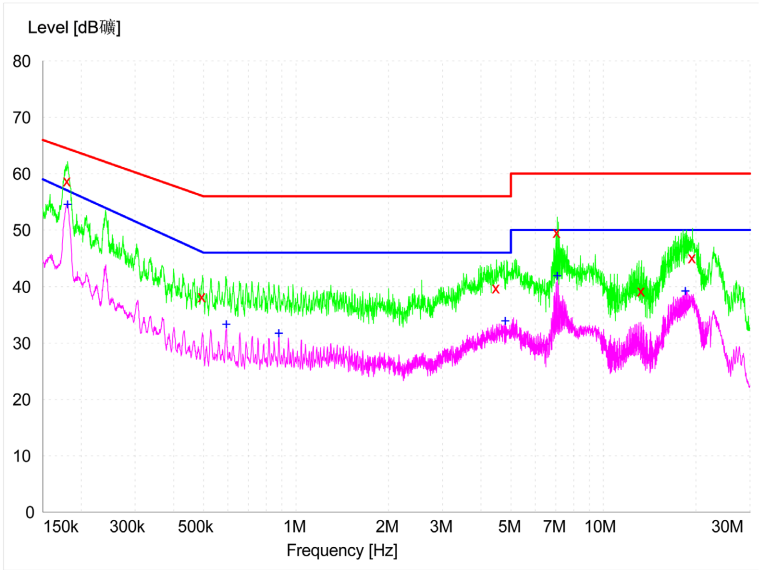


Figure 3. Conducted interference test results after common mode inductor adjustment
图 3. 调整共模电感后的传导干扰测试结果

此时, 除 180 KHz 频率点余量不足 3 dB 外, 其余均满足企标要求。该频率点为 PFC 载波 60 KHz 的倍频, 主要为差模干扰。在整流桥与共模电感间增加 2.2 μF X 电容, 加大差模滤波, 180 KHz 余量达到 7.2 dB, 测试结果见图 4:

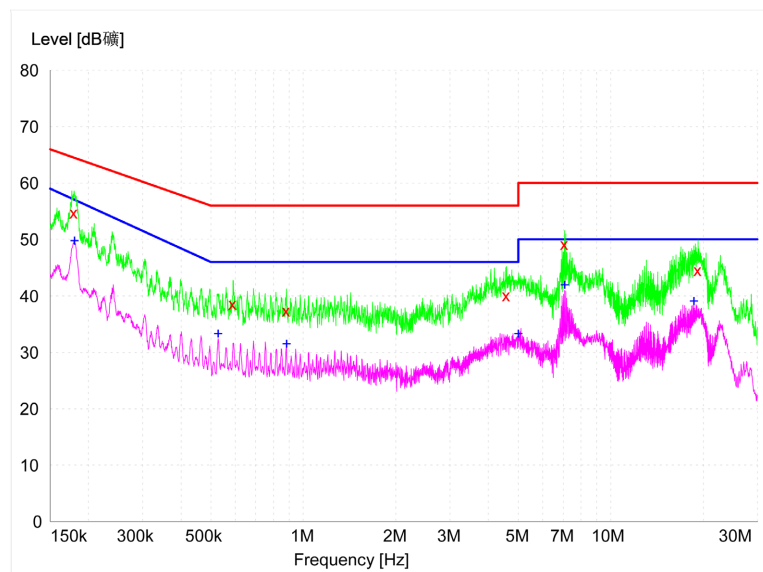


Figure 4. Conducted interference test results after adding X capacitor

图 4. 增加 X 电容后的传导干扰测试结果

如上, 整机传导干扰测试余量满足企标要求。

通过上述整改分析, 判断由于空调功率器件 IGBT、IPM 等, 存在大电流、高压开关, 但开关频率通常不超过 100 KHz, 其差模干扰与共模干扰分布与其他电器有一定差异, 尤其是在低频 150 KHz~1 MHz, 差模干扰与共模干扰均存在。在进行滤波电路设计时, 需要综合考虑; 对于高频 PFC 导致的低频倍频干扰, 可以通过增大 X 电容的方式, 增加测试余量。

在整改过程中发现, 电源线长度与走线路径对传导干扰具有显著影响。例如, 当电源线过长或与变频压缩机驱动线平行布线时, 会通过互感耦合引入额外 EMI 干扰。为此, 对电源线及压缩机走线进行了规范限制。

4.2. 辐射干扰优化整改

外机完成传导干扰整改后, 进行辐射干扰测试, 发现在频率 110 MHz 左右, 准峰值余量只有 3.7 dB, 离要求的 3 dB 余量较低, 为此尝试进行优化整改。室外机到室内机侧的机组连线干扰功率测试时, 初始状态测试结果见图 5。

结合产生 EMC 问题的三要素, 对于本项测试, 由于只是进行余量优化, 尝试从耦合途径方向考虑整改。外机控制器输入电源线通过绕制磁环来进行 EMC 滤波, 但是在系统中, 各种线路之间的噪声耦合到交流电源线上形成辐射噪声, 这部分噪声在传统的传导噪声滤波器中很少被考虑[8]。使用磁环时, 放置的位置会对电磁兼容产生很大的影响。一般添加磁环时, 应尽量选择靠近供电电源处[9]。同时电控输入电源线也是接收和屏蔽辐射干扰的关键点, 利用 1/4 波长谐振原理, 110 MHz 干扰的 1/4 波长约为 0.68 m, 电控输入电源线长度约 0.33 m, 电源线容易成为该频段干扰的吸收天线。因此, 将电控电源线磁环位置进行调整, 从靠近电控印制板位置调整到靠近外机接线端子位置。调整后测试结果见图 6:

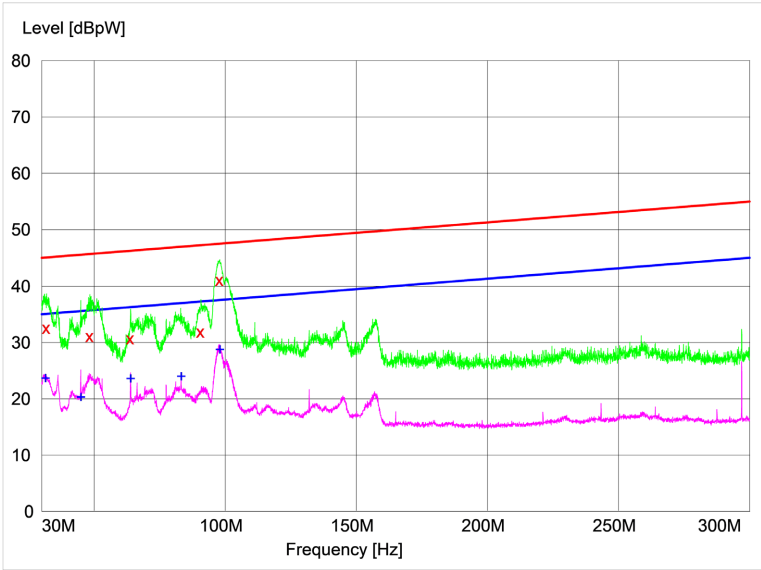


Figure 5. Initial state radiated interference test results
图 5. 初始状态辐射干扰测试结果

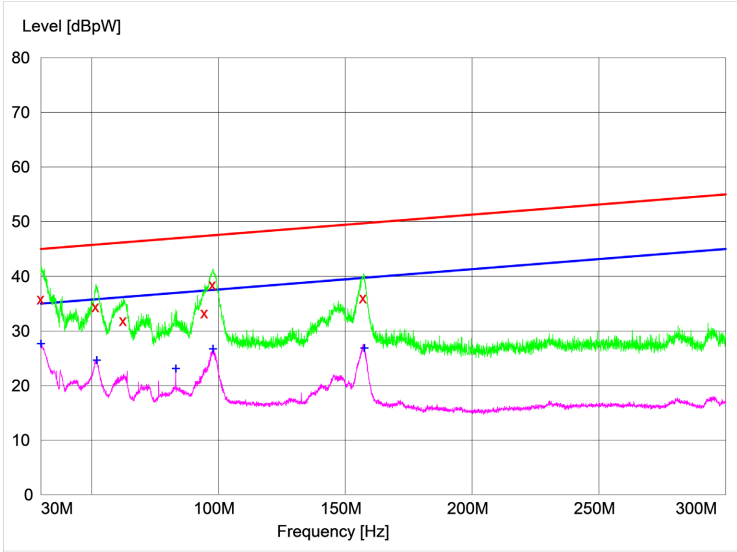


Figure 6. Radiated interference test results after magnetic ring position adjustment
图 6. 初调整磁环位置后的辐射干扰测试结果

调整后，在频率 110 MHz 左右，准峰值余量增加到 6.4 dB。同时，再进行磁环调整后的传导干扰测试，在 10~30 MHz 有一定改善，没有骚扰功率明显。磁环位置更改前后，见图 7。

5. 结束语

本文通过空调产品 EMI 整改实例，探讨了传导干扰与辐射干扰的分析与优化方法。研究表明，针对传导干扰超标问题，结合内外机干扰分离及差共模干扰特性，通过调整共模电感阻抗、增大 X 电容等滤波措施，有效抑制了低频段差模与共模干扰的叠加效应，使传导干扰余量满足企标要求。在辐射干扰优化中，通过分析干扰耦合路径，优化磁环安装位置(如靠近外机接线端子)，显著提升了 110 MHz 频段的余量，验证了耦合路径优化对高频辐射抑制的有效性。

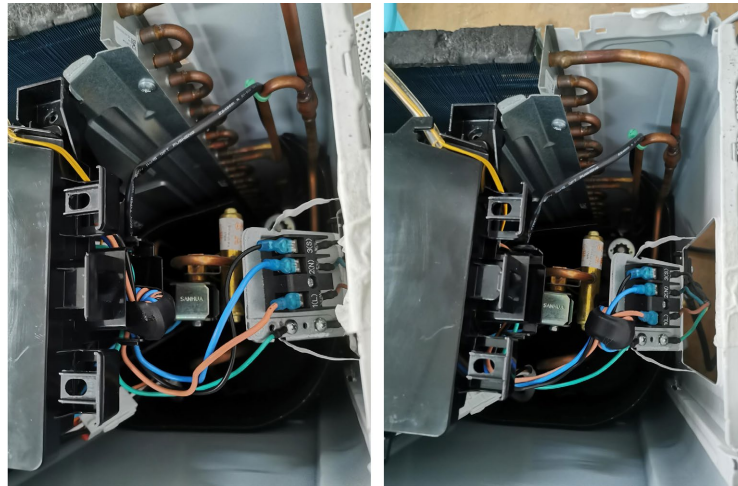


Figure 7. Comparison before and after magnetic ring position modification
图 7. 磁环位置更改前后对比图

整改过程中发现, 空调功率器件(如 IGBT、IPM)因大电流、高压开关特性, 其低频段(150 kHz~1 MHz)差模与共模干扰共存现象与传统电器存在差异, 需在滤波设计中综合考量差共模抑制措施。此外, 磁环位置对辐射干扰的敏感性表明, 精细化布局与布线设计对 EMC 性能至关重要。

本文的整改思路可为家用空调及其他大功率设备的 EMC 设计提供参考, 但实际应用中仍需结合具体干扰源特性灵活调整方案。未来可进一步探索智能化滤波设计、高频干扰精准定位技术, 以提升 EMC 整改效率与可靠性。但是, 随着宽禁带半导体(如 SiC、GaN)在变频空调中的普及, 开关频率的进一步提升将带来更高频段的 EMI 挑战(如 >100 MHz)。此类干扰的波长更短, 易通过结构缝隙或线缆辐射, 传统滤波手段可能失效。因此, 需探索新型抑制技术, 如智能自适应滤波算法、压缩机、PFC 载波频率变化等。同时, 建立 EMI 大数据平台, 通过机器学习分析历史整改案例, 可为不同拓扑结构的空调提供预判性设计建议, 大幅缩短研发周期。

参考文献

- [1] 马俊. 基于逆变系统的传导电磁干扰建模和预测[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [2] 王朋, 董荻莎. 传导干扰共差模分离的滤波器优化设计方法[J]. 安全与电磁兼容, 2023(4): 54-59.
- [3] 吴林喜. 骚扰分析和系统核查方法的电磁兼容传导发射[J]. 内燃机与配件, 2024(10): 27-29.
- [4] 曾春亮, 华洪香. 空调产品 EMC 设计和整改分析[J]. 家电科技, 2011(7): 78-79.
- [5] 刘智勇. 电力电子装置传导 EMI 分析及抑制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [6] 夏海石, 龚钊潮, 林成霖. 空调 EMC 测试整改方法浅谈[J]. 科技创业家, 2013(7): 63.
- [7] 李春梅. 电磁干扰的机理与消除的方法[J]. 山西电子技术, 2003(3): 23-24.
- [8] 马俊. 基于逆变系统的传导电磁干扰建模和预测[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [9] 田金城, 杨磊, 秦东斌, 杨伟. 铁氧体磁环在变频热泵热水器电磁兼容中的应用[C]//中国家用电器协会. 2017 年中国家用电器技术大会论文集. 北京: 《电器》杂志社, 2017: 781-783.