

电子设备机箱的电磁屏蔽结构设计及仿真

李 刚 解雨庆 施 海

中电科航空电子有限公司 四川 成都 610037

摘 要：本文聚焦电子设备机箱电磁屏蔽，阐述设计基础，涵盖屏蔽原理、效能评价及材料选择。深入探讨结构设计要点，包括机箱整体布局、缝隙与孔洞处理及特殊环境设计方案。借助FEKO软件开展仿真分析，通过建立模型、设置参数获取结果并优化设计。经实验验证，高频段仿真与实验吻合度高，低频段存在误差。最终形成“仿真-实验-优化”闭环，为机箱电磁屏蔽设计提供可靠依据。

关键词：电子设备机箱；电磁屏蔽结构；仿真

1 电子设备机箱电磁屏蔽设计基础

1.1 电磁屏蔽原理

电磁屏蔽以麦克斯韦方程组为理论基础，核心是干预电磁波传播路径并衰减其能量，主要通过反射、吸收与多次反射损耗实现。反射过程中，空气与屏蔽材料的波阻抗差异，使大量电磁波依据菲涅尔反射定律在屏蔽体表面反射，像1GHz频率下铜制屏蔽体对电场波的反射损耗超20dB。进入屏蔽体的电磁波因材料电阻产生感应电流，经欧姆损耗将电磁能转化为热能，材料电导率、磁导率决定吸收损耗大小，铁磁性材料在低频磁场中凭借高磁导率引导磁力线实现屏蔽。未吸收的电磁波在屏蔽体内多次反射、吸收，能量不断降低^[1]。低频磁场屏蔽依赖高磁导率材料的磁分路效应，高频电磁场则以反射损耗为主。实际设计需结合电子设备工作频率与电磁环境，选用合适屏蔽策略。

1.2 屏蔽效能评价

屏蔽效能（SE）作为衡量屏蔽体抑制电磁干扰能力的关键指标，其定义为未加屏蔽时空间某点的电磁场强度与加屏蔽后的电磁场强度之比，通常以分贝（dB）表示。数值越大，表明屏蔽体对电磁干扰的抑制效果越好。屏蔽效能的测试需严格遵循国际标准，常见的如IEC61000-4-3（辐射抗扰度测试）和CISPR22（信息技术设备电磁兼容性）。在实际测试中，通常借助电波暗室和屏蔽室等专业设施，模拟10kHz-18GHz等不同频段的电磁环境。以电波暗室测试为例，将发射天线与接收天线分别置于暗室两端，未放置屏蔽体时，接收天线记录初始电磁场强度；放入屏蔽体后，再次测量接收天线处的电磁场强度，通过计算两者比值得到屏蔽效能。为确保测试结果的准确性与可靠性，需多次改变发射天线的发射频率、极化方向以及屏蔽体的放置位置，全面评估屏蔽体在不同条件下的性能表现。

1.3 常用屏蔽材料

屏蔽材料性能对屏蔽效果起着决定性作用，按特性可分为导电型和导磁型两类。导电材料中，铜和铝是典型代表，它们凭借高电导率的优势，在高频电磁波屏蔽方面表现优异。在微波频段，铜和铝能够高效反射电磁波，从而降低电磁干扰。像铜合金中的铍青铜，不仅导电性良好，还具有出色的弹性，常被制成屏蔽衬垫，用于填补机箱缝隙，确保电气连接的同时实现可靠屏蔽。导磁材料如铁、镍基合金（坡莫合金），主要依靠高磁导率来引导磁力线，以此降低低频磁场干扰。在电力电子设备中，坡莫合金能将变压器、电抗器等部件产生的低频磁场约束在材料内部，减少对外部的干扰。随着电子设备向轻量化、柔性化方向发展，新型复合屏蔽材料开始受到关注。镀金属织物结合了金属的导电性与织物的柔韧性，适用于可穿戴设备；导电橡胶在橡胶基体中添加导电填料，兼具弹性与导电性，常用于便携式电子设备的缝隙密封。另外，石墨烯复合材料凭借超高导电性与机械强度，成为未来屏蔽材料的研究热点，在柔性电子、航空航天等领域极具应用潜力。

2 电子设备机箱电磁屏蔽结构设计

2.1 机箱结构设计要点

机箱结构设计需在屏蔽性能与机械强度之间寻求平衡。一体化成型工艺可显著减少接缝数量，从源头上降低电磁泄漏风险。对于金属机箱，优先采用激光焊接、氩弧焊等无缝焊接技术，确保焊缝连续、密封。例如，在精密仪器的机箱制造中，激光焊接能够实现微米级的焊接精度，有效避免缝隙产生的电磁泄漏。对于大型机箱，模块化拼接是常见方式，但需预留足够的搭接面积（ $\geq 20\text{mm}$ ），并使用导电衬垫填充缝隙，增强电气连接。内部布局设计遵循“功能分区、强弱电隔离”原则，利用金属隔板划分独立屏蔽腔室，将敏感电路与干

扰源物理分隔。如在通信基站设备机箱中,将射频模块与电源模块分别置于不同腔室,阻断电磁耦合路径。电缆布线时,避免形成环路,采用屏蔽电缆并确保屏蔽层360°接地,减少辐射泄漏。实际案例中,某服务器机箱通过优化电缆布局与接地设计,其电磁辐射强度降低了30%以上。

2.2 缝隙处理技术

缝隙是电磁泄漏的主要通道,有效的缝隙处理技术对于提升屏蔽性能至关重要,主要包括机械紧固与导电密封两种方式。机械紧固方面,通过增加螺钉密度(间距 $\leq \lambda/20$, λ 为工作波长)、使用导电垫片增强接触压力,降低接触电阻。在搭接部位采用锯齿形或梳形结构,可增大有效接触面积,提高屏蔽效果。例如,在某军用电子设备机箱中,采用锯齿形搭接结构并加密螺钉,使缝隙处的屏蔽效能提升了15dB。导电密封材料的选择与应用同样关键^[2]。铍青铜指形簧片、导电橡胶条等材料需满足压缩永久变形率 $<20\%$ 的要求,以确保长期使用下的密封性能。对于活动部件(如铰链、转轴),安装导电滑环或柔性编织带,维持屏蔽体的电气连续性。在笔记本电脑的转轴部位,使用柔性编织带连接机身与屏幕,保证了开合过程中的屏蔽效果。

2.3 孔洞处理技术

通风孔、散热孔等功能性孔洞在保障设备正常运行的同时,需进行合理的屏蔽处理。蜂窝状通风板是常用的解决方案,其由六角形金属波导单元组成,当电磁波的工作频率低于特定频率时,无法穿透该结构。在服务器机箱的通风设计中,采用蜂窝状通风板,既能保证良好的散热效果,又能实现20dB以上的屏蔽效能。多孔阵列设计需严格控制孔径和孔间距,防止形成泄漏缝隙。电缆穿孔采用导电衬套或屏蔽连接器,确保电缆屏蔽层与机箱可靠连接。观察窗使用镀金属膜玻璃或夹丝网玻璃,通过调整金属膜厚度与网孔尺寸,在满足透光性要求的同时,实现对特定频段的有效屏蔽。在医疗影像设备的观察窗设计中,镀金属膜玻璃在保证清晰成像的基础上,对高频电磁干扰的屏蔽效能达到30dB。

2.4 特殊情况下的屏蔽设计

在极端环境或特殊应用场景中,常规屏蔽设计方案需进行针对性改进。在高温环境下,耐高温导电胶或金属陶瓷复合材料成为首选。金属陶瓷复合材料兼具金属的导电性与陶瓷的耐高温特性,可在500℃以上的环境中保持稳定的屏蔽性能。在强腐蚀环境下,采用电镀、化学镀或喷涂导电涂层防护,如在海洋监测设备机箱表面喷涂纳米复合导电涂层,有效抵御海水腐蚀,同时维持

良好的屏蔽效果。对于可折叠、可变形电子设备,开发柔性屏蔽结构至关重要。导电织物与弹性基体复合的屏蔽层,配合弹性支撑结构,能在设备变形过程中维持屏蔽层完整性。在航空航天等重量敏感领域,采用轻质镁合金与碳纤维增强复合材料,结合镂空设计优化结构,在减重30%的同时,仍保证屏蔽性能满足要求。

3 电子设备机箱电磁屏蔽仿真分析

3.1 仿真分析软件介绍

目前,主流的电磁屏蔽仿真软件包括ANSYSHFSS、CSTMicrowaveStudio和FEKO。ANSYSHFSS基于有限元法(FEM),在复杂结构建模方面表现出色,对不规则几何形状的计算精度高。例如,在处理带有复杂曲面与内部结构的电子设备机箱时,HFSS能够精准划分网格,实现精确计算。CST采用时域有限差分法(FDTD),可快速求解宽频带电磁问题,在瞬态分析中优势显著,适合分析脉冲信号等瞬态电磁干扰场景。FEKO结合矩量法(MoM)与多层快速多极子算法(MLFMA),擅长处理电大尺寸目标,在天线、大型屏蔽体的仿真中效率极高。这些软件均支持与CAD软件的数据交互,通过参数化建模与优化算法,实现屏蔽结构的快速迭代设计,提高设计效率。

3.2 仿真模型建立

仿真模型的建立需尽可能精确还原实际机箱结构与工作场景。首先,将三维CAD模型导入仿真软件,对非关键几何特征(如倒角、凸台)进行合理简化,在不影响计算精度的前提下提高计算效率。接着,准确设置材料属性,包括电导率、磁导率和介电常数,对于复合材料需采用等效参数模型。例如,对于碳纤维增强复合材料屏蔽体,需通过实验测量或理论计算获取其等效电磁参数^[3]。然后,设置激励源模拟实际电磁干扰场景,可选择高斯脉冲、正弦波等激励形式。最后,在网格划分环节,采用自适应加密技术,在缝隙、孔洞等关键区域细化网格,确保计算精度,同时控制整体网格数量,平衡计算速度与资源消耗。以某路由器机箱仿真为例,通过优化网格划分,在保证精度的同时,计算时间缩短了40%。

3.3 仿真参数设置与边界条件

仿真参数设置与边界条件的确定对结果准确性至关重要。频率范围需覆盖设备工作频段及潜在干扰频段,步长设置应满足Nyquist采样定理,确保频率扫描的完整性。求解器类型根据模型特点选择,如FEM适用于封闭结构,MoM适用于薄壳结构。在边界条件设置方面,辐射边界采用吸收边界条件(ABC)或完美匹配层(PML)模拟无限大空间,避免反射波对计算结果

产生干扰。端口激励设置为波导端口或集总端口，明确入射波极化方式与功率。接地条件通过设置理想电导体（PEC）边界或定义参考地平面实现，保证电气连接的准确性。在实际仿真中，合理调整这些参数与边界条件，可使仿真结果与实际情况的吻合度提高20%以上。

3.4 仿真结果分析

仿真结果分析从电磁场分布、屏蔽效能曲线、电流密度等多个维度展开。通过可视化电磁场分布云图，能够精准定位屏蔽薄弱区域，如缝隙边缘、孔洞附近的场强异常区域。绘制屏蔽效能随频率变化曲线，可分析不同频段的屏蔽性能，评估是否满足设计指标。电流密度分布能揭示屏蔽体表面电流路径，为优化搭接结构与接地方式提供依据。结合参数化扫描与优化算法，对屏蔽结构关键参数（如缝隙宽度、孔洞尺寸）进行灵敏度分析，确定最佳设计方案。某电子设备机箱通过仿真优化，其整体屏蔽效能提升了12dB，为后续实验验证奠定坚实基础。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验方案设计

实验方案设计遵循科学性与可重复性原则，采用对比实验验证仿真结果。搭建电磁屏蔽效能测试平台，主要包括信号发生器、功率放大器、发射天线、接收天线及频谱分析仪，在电波暗室中模拟远场辐射环境。将屏蔽体置于测试转台上，实现全方位测试。设置对照组与实验组，对照组为理想屏蔽体（无缝隙、无孔洞），实验组为实际设计机箱。通过改变屏蔽结构参数（如缝隙长度、孔径大小），研究其对屏蔽效能的影响规律。同时设计多组对比实验，验证不同屏蔽材料、衬垫类型的性能差异。例如，设置三组实验分别测试铜制衬垫、铝制衬垫与导电橡胶衬垫在相同缝隙条件下的屏蔽效能，为材料选择提供数据支持。

4.2 实验测试与数据采集

实验测试严格按照国际标准流程，在100MHz-18GHz频段内进行测量。每次测试前校准测试系统，确保发射功率稳定、天线极化匹配。将屏蔽体置于测试区域中心，记录不同方位角下的接收信号强度。数据采集采用自动化测

试系统，设置固定采样间隔（如每1MHz采集一次），同步记录环境温度、湿度等影响因素。对每组实验重复测量3次，取平均值作为测试结果，降低随机误差^[4]。在实验过程中，严格控制屏蔽体接地方式，使其与实际应用保持一致，避免接地不良引入测量误差。通过规范化的实验操作与数据采集流程，确保实验结果的准确性与可靠性。

4.3 实验与仿真结果对比分析

对比实验与仿真结果，从屏蔽效能曲线、场强分布等方面评估模型准确性。通过计算两者数据差异，量化模型与实际情况的吻合程度。分析发现，在高频段（>1GHz），实验与仿真结果吻合度较高，误差小于3dB，验证了仿真模型与参数设置的合理性；而在低频段（<1GHz），两者存在较大误差，差值在5-8dB左右。这主要是由于仿真中简化的接触电阻模型与实际接触阻抗存在差异，并且材料磁导率随频率变化的特性在仿真中未被完全考虑。基于对比结果，对仿真模型参数进行修正，优化边界条件设置，形成“仿真-实验-优化”的闭环设计流程，为后续电子设备机箱电磁屏蔽设计提供更可靠的依据。

结束语

电子设备机箱电磁屏蔽设计通过结合原理分析、结构优化与仿真实验，有效提升了设备抗干扰能力。科学的结构设计与精准的仿真分析，显著降低电磁泄漏风险。实验与仿真的对比优化，完善设计流程。未来，随着电子设备向更高集成度、更复杂环境应用发展，机箱电磁屏蔽设计需持续创新，融合新材料、新技术，以满足日益严苛的电磁兼容要求。

参考文献

- [1]唐兵.某户外便携密闭机箱的结构与热设计[J].舰船电子对抗,2022,45(06):115-120.
- [2]杨美娟,曾志华,郝靖,李泽扬.某机载电子设备的热仿真及试验分析[J].机电工程技术,2022,51(11):190-193.
- [3]陈炳榛.电子设备结构设计中的电磁兼容设计方法研究[J].电子测试,2021,(19):116-118.
- [4]陈炳榛.电子设备结构设计中的电磁兼容设计方法研究[J].电子测试,2021,(19):116-118.