

# 趋肤效应的影响及解决办法

原创 皮诺曹 射频通信链 2025年07月01日 14:13 江苏



射频通信链

学射频，学通信，就看射频通信链。

334篇原创内容

公众号

射频微波设计中，经常会听到高频趋肤效应显著，需要降低高频趋肤效应的影响，那么什么是趋肤效应呢，怎么降低影响？

## 一、趋肤效应的本质与数学描述

物理本质：

当交变电流通过导体时，电流产生的交变磁场在导体内感应出涡流。涡流在导体中心区域与主电流方向相反，削弱中心电流；在表面区域与主电流方向相同，增强表面电流，最终导致电流集中于导体表层。这一现象由电磁感应定律（法拉第定律）和楞次定律共同作用产生。

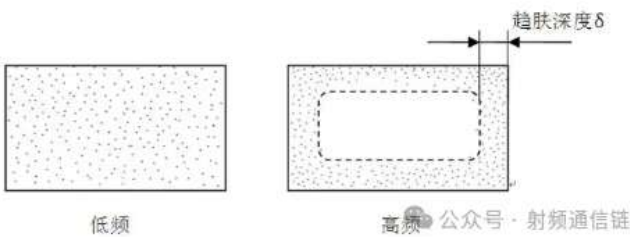
数学表达 —— 趋肤深度计算：

趋肤深度  $\delta$  是衡量电流集中程度的关键参数，定义为电流密度衰减至表面密度  $1/e$ （约 37%）时的深度，公式为：

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

其中：

- $\rho$  为导体电阻率，
- $\omega = 2\pi f$  为角频率，
- $\mu$  为材料的磁导率。



能量损耗：中心区域的涡流与原电流的相互作用会产生额外的焦耳热，使得导体内部能量损耗更大，迫使电流更多地分布在电阻更小的表面路径。

实例对比：

- 铜导体在工频（ $f=50\text{ Hz}$ ）时， $\delta \approx 9.2\text{ mm}$ ，电流几乎均匀分布；
- 当  $f=1\text{ MHz}$  时， $\delta \approx 0.066\text{ mm}$ ，电流集中在表面极薄一层。

广告

## 全国在职研究生

NATIONWIDE ADULT UNDERGRADUATE

发布日期: 2025年4月

**招生通知:**

即日起，各大学正式面向专科及以上在职人员招生，2年制硕士，全部学费12800元，无需到校，毕业证+学生证，国家认可。

招生名额有限，招满即止！

在职硕士（2025）招生：学费15000元，2年制免到校，院校颁发证书

瀚旻教育

[查看详情](#)

## 二、趋肤效应的影响

### 电气性能劣化

#### ◦交流电阻激增：

由于有效导电截面积  $A$  减小，交流电阻  $R_{AC}$  远大于直流电阻  $R_{DC}$ 。

例如，1mm 直径铜线在 1MHz 时的  $R_{AC}$  约为  $R_{DC}$  的 12 倍。

#### ◦功率损耗增大：

损耗  $P = I^2 R_{AC}$  随频率升高呈指数增长，高频变压器、射频放大器等设备需额外散热设计。

### 信号传输质量下降

#### ◦高频信号衰减加剧：

射频电缆（如同轴电缆）中，趋肤效应导致信号能量沿传输方向快速衰减，例如 50Ω 同轴电缆在 1GHz 时的衰减可达 0.1 dB/m 以上。

#### ◦波形失真：

信号中高频分量的衰减比低频更严重，导致数字信号上升沿变缓、模拟信号谐波失真，影响通信系统的信噪比（SNR）。

### 材料利用率降低

粗导线在高频下中心区域几乎无电流流过，例如直径 10mm 的铜导线在 100kHz 时，中心 80% 的材料未被有效利用，造成成本浪费。

## 三、工程解决方案

### 导体结构优化

#### ◦利兹线（Litz Wire）—— 高频场景的核心方案：

将多股绝缘细导线（直径通常小于  $\delta/2$ ）按特定规则绞合（如分层绞合、换位绞合），使每根细线的电磁场分布均匀，避免“集肤”效应。例如，1MHz 下使用 0.1mm 直径的利兹线，有效电阻可比单股导线降低 80% 以上。

#### ◦扁平导体与空心结构：

扁平电缆（如 PCB 铜箔）通过增大表面积 / 体积比，使电流分布更均匀；空心铜管（如微波波导）在不降低导电能力的前提下减轻重量，常用于射频天线和高频传输线。

### 材料与工艺改进

#### ◦高导电率材料与表面镀层：

银的趋肤深度比铜大 10%；铜导线表面镀银（厚度  $>\delta$ ）可降低表面电阻，同时抗氧化。

#### ◦低磁导率材料选型：



无需下载，点开即玩！全套+15粉装+神兽坐骑+13阶翅膀+10万元宝！

青云诀之伏魔

[查看](#)

避免使用铁磁材料（如铁、镍）作为导体，改用铜、铝等非磁性材料，以增大  $\delta$ 。例如，变压器绕组若用铁导线，其交流电阻可达铜导线的数十倍。

### 传输线与系统设计优化

#### ◦同轴电缆与波导结构：

同轴电缆的外导体屏蔽层利用趋肤效应限制电磁场泄漏，同时内导体直径按  $\delta$  设计（如 50Ω 电缆内导体直径常取  $2\delta$ ）；微波段（ $>1\text{GHz}$ ）采用波导，利用电磁波在金属壁表面的传导特性，避免实体导线的趋肤损耗。

#### ◦分布式参数设计：

在高频电路中，将导线视为分布参数网络（电感、电容、电阻的串联 / 并联），通过阻抗匹配（如 50Ω 标准）减小反射，间接降低趋肤效应的影响。

频率与系统架构调整

- 若系统允许，降低工作频率（如将射频信号下变频至中频）可直接增大 $\delta$ ，但受限于带宽需求（如 5G 通信无法通过降频解决趋肤效应）。

四、总结

趋肤效应的本质是电磁场与导体的动态相互作用，其影响随频率升高呈非线性增长。解决该问题的核心逻辑是：通过增大有效表面积（利兹线、扁平导体）、优化材料导电特性（银镀层、低磁导率材料）和重构传输路径（同轴电缆、波导），在电流“被迫”集中于表面的前提下，最大化利用导体表层的导电能力。这一过程体现了电磁理论从基础现象到工程应用的转化，也是高频电路设计中必须掌握的关键知识点。

最后的话

射频的学习不再是孤立的器件调试，而是从整体的角度去理解系统，理解器件，理解指标。

射频收发系统的指标设计与分解已经300+人加入了，如果你也想提升射频能力，系统的学

习射频，学习射频通信，课程介绍 [戳链接](#) ，除了课程视频，还有课件PPT，一群一起学习

的人，遇到问题解决不了，需要咨询，可以和群友一起讨论，也可以咨询我。

相信能帮助你走的更快、更稳、更远！

感兴趣扫码咨询。



皮诺曹

“ 射频工程师加油 ”

喜欢作者

广告

砍几个小怪竟然爆了大天使之剑！？



巅峰霸业

打开游戏

留言

都在搜: [趋肤效应与频率的关系](#)

写留言