

趋肤效应简介

引言

当导体中有交流电或者交变电磁场时，导体内部的电流分布不均匀，电流集中在导体的“皮肤”部分，也就是说电流集中在导体外表的薄层，越靠近导体表面，电流密度越大，导体内部实际上电流较小。结果使导体的电阻增加，使它的损耗功率也增加，这一现象称为趋肤效应(skin effect)。

趋肤效应的原理

在计算导线的电阻和电感时，假设电流是均匀分布于它的截面上。严格说来，这一假设仅在导体内的电流变化率(di/dt)为零时才成立。另一种说法是，导线通过直流(dc)时，能保证电流密度是均匀的。或者电流变化率很小，电流分布仍可认为是均匀的。对于工作于低频的细导线，如图 1 所示，这一论述仍然是可确信的。

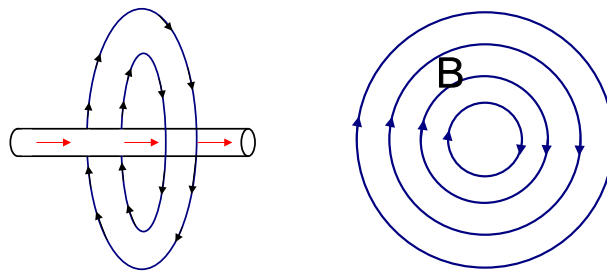


图 1.低频

但在高频电路中，电流变化率非常大，不均匀分布的状态甚为严重。如图 2 所示，电流主要集中于导体表面的橙黄色部分，导体内的电流密度呈指数递减。高频电流在导线中产生的磁场在导线的中心区域感应出最大的电动势。由于感应的电动势在闭合电路中产生感应电流，在导线中心的感应电流最大。因为感应电流总是在减小原来电流的方向，它迫使电流只限于靠近导线外表面处。效应产生的原因主要是变化的电磁场在导体内部产生了涡旋电场，与原来的电流相抵消。

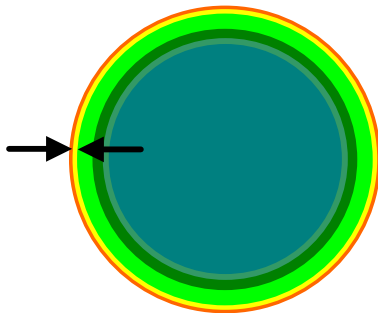


图 2.高频

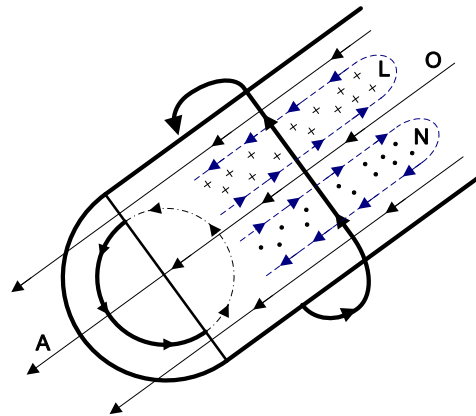


图 3.趋肤效应

如图 3 所示，当导体流过电流，由右手螺旋法则可知，产生的感应电动势的方向，产生磁力线。如果导体中的电流增加，则由于电磁感应效应，导体中产生如图 3 所示方向的涡流。涡流的方向加大了导体表面的电流，抵消了中心线电流，对导体的表现为电流向导体表面聚集。

趋肤深度的计算

导体中的交变电流在趋近导体表面处电流密度增大的效应。在直长导体的截面上，恒定的电流是均匀分布的。对于交变电流，导体中出现自感电动势抵抗电流的通过。这个电动势的大小正比于导体单位时间所切割的磁通量。由于自感电动势随着频率的提高而增加，趋肤效应亦随着频率提高而更为显著。趋肤效应使导体中通过电流时的有效截面积减小，从而使其有效电阻变大。

趋肤效应还可用电磁波向导体中透入的过程加以说明。电磁波向导体内部透入时，因为能量损失而逐渐衰减。当波幅衰减为表面波幅的 1/e 倍的深度称为交变电磁场对导体的透入深度。以平面电磁波对半无限大导体的透入为例，透入深度为：

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f\mu}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (1)$$

其中：Δ为透入深度 (m)； ρ：导体的电阻率 (Ωm)； μ：导体材料的磁导率 (H/m)；
f：电流频率 Hz； ω：角频率 (rad/s), ω=2πf； σ：磁导率 (S/m)。

方程式中可见透入深度的大小与这三个量成反比。趋肤效应是否显著也可以由导体尺寸与其中电磁波波长的比较来判断。如果导体的厚度较导体中这一波长长，趋肤效应就显著。

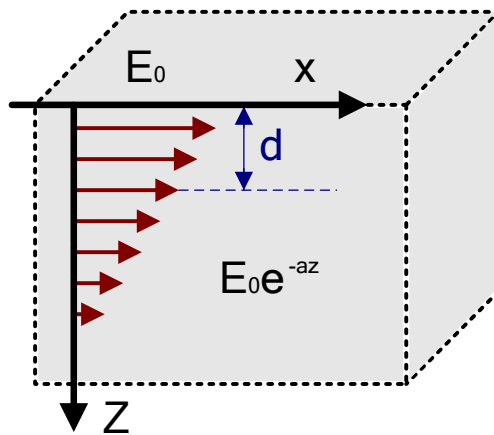


图 4.趋肤深度

趋肤效应的应用

在交流电传输线路设计中，电流集中在导体的表面，导致实际电流截面减小，电阻增加，必须考虑集肤效应的影响。对于铜导体，计算在 50Hz 交流电下的穿透深度为：

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \times 50 \times 58 \times 10^6 \times 4\pi \times 10^{-7}}} \approx 9.28 \times 10^{-3} \text{m} \quad (2)$$

当导线为铜线时，σ=58×10⁶ (S/m)，铜的相对磁导率 μ_r=1，使用，式中 μ=μ_r×μ₀=4π×10⁻⁷。

可见趋肤深度与频率的开方成反比，与电阻率的开方成正比。

为了传输更大的电流，对于大电流传输，通常导体截面积较大，远离表面的中心处，电流密度还是会明显减小，因此，传输交流大电流的导体，通常制作成截面积为长方形，而不是圆形或正方形，并且一般不能太厚，对于 50Hz 的工频交流电，导体为铜，其趋肤深度约 9mm，这样，对于厚度大于 16mm 的铜排，其中心层电流密度已经非常小了，因此，用于传输工频电流的铜排的厚度一般小于 12mm。

同时因为趋肤效应使电流趋于表面流动，将其表面镀银或镀金，降低表面电阻，可以改善导线的交流电阻。

对于相同截面积的导线，表面积越大，等效电阻越小，因此，利用互相绝缘的多根细导线代替单根实心导线，可以改善降低导线的交流电阻。

或者将导线制成空心导线，其导电效果与实心导线基本相当，可节省材料。