

传输线中趋肤效应的介绍及仿真^{*}

卢秋朋 张清鹏 秦润杰

(天津市特种设备监督检验技术研究院 天津 300192)

摘要: 受趋肤效应的影响,在导线中分别流经高频电流和直流电流时,在导线横街面上的电流密度分布情况截然不同。详细介绍了趋肤效应的理论基础、考虑趋肤深度时导线电阻的计算公式,并利用 Ansoft Maxwell 电磁场仿真软件分别对圆形导线和矩形导线 2 种导线在不同频率情况下的趋肤效应进行了建模仿真,得出了导线的趋肤效应现象图。并通过对比不同频率时导线横截面的电流密度分布情况,验证了随着频率的升高,趋肤深度将越小,导线的电阻损耗越大。

关键词: 趋肤效应;趋肤深度;Ansoft Maxwell;仿真

中图分类号: TM15 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.35

Introduction and simulation of skin effect of transmission line

Lu Qiupeng Zhang Qingpeng Qin Runjie

(Tianjin Special Equipment Inspection Institution, Tianjin 300192, China)

Abstract: Affected by the influence of skin effect, the current density distribution on the conductor cross-section is completely different when there is high frequency current and direct current flowing through the conductor respectively. In this article, the theoretical basis of skin effect and the calculation formula of conductor resistance were introduced. With the help of Ansoft Maxwell electromagnetic field simulation software, a circular wire and a rectangular wire were modeled and simulated, and the figures of skin effect under different current frequency were given. It is also proved that with the increase of current frequency, the skin depth will be smaller and the resistance loss of the wire will be greater by comparing the current density distribution on the conductor cross-section under different frequency.

Keywords: skin effect; skin depth; Ansoft Maxwell; simulation

1 引言

趋肤效应是电子系统频率不断提高以后电子工程师经常遇到的困扰之一。受趋肤效应的影响,传输线中的阻性损耗会急剧增加,影响数字系统的性能,如:降低信号幅度,从而影响噪声容限;减慢边沿变化率,进而影响时序容限。

许多学者已经对趋肤效应与导体电阻之间的关系进行了研究,文献[1]通过直接求解传输线中的电流分布分析了传输线的趋肤效应,推导了孤立圆导线单位长度的电阻计算公式。文献[2]通过求解 Maxwell 电磁场方程组,推导出了矩形母线矢量磁位满足的二维微分方程,并通过有限元仿真得到孤立导体、单相双导体及三相三导体的集肤效应系数曲线。文献[3]在考虑趋肤效应和邻近效应的基础上,利用有限元法对电缆群不同排列方式和接地方式下的导体交流损耗和金属屏蔽层涡流损耗进行了计算。文献[4]通过对 ANSYS 在电磁场中集肤效应仿真的理论基础、

具体步骤、注意要点等进行了论述,得出模拟分析的圆形导线的集肤效应现象图,文献[5]利用积分方程数值分析方法研究了矩形截面导体的趋肤效应,推导出了积分方程法的计算方法和步骤,最后分析了频率和导体厚度对交流损耗的影响。

虽然很多学者对传输线的趋肤效应进行了研究,但是他们的主要研究方向多是偏向于复杂的理论分析和求解计算。所以在此基础上,为了更直观的了解趋肤效应对导线横截面电流密度分布的影响,利用 Ansoft Maxwell 电磁场仿真软件仿真得出了导线的趋肤效应现象图,并验证了电流频率与趋肤深度的反比关系。

2 电阻与趋肤深度的关系介绍

在直流电路里,电流均匀地分布在均匀导线的横截面上,即在均匀导线横截面上的电流密度是均匀的。但是在

交流电路里,均匀导线横截面上的电流密度就变得不均匀了,它与电流的频率有关,随着电流频率的增加,在导线横截面上越靠近导线表面处电流密度越大,这种现象就叫做趋肤效应^[6-7]。

在直流电路中,导线的电阻值主要取决于两个因素:导线的电阻率和电流流过的总面积,其计算公式如式(1)所示。

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1)$$

式中: R 是导线总电阻, ρ 是导线材料的电阻率(电导率的倒数),单位是 $\Omega \cdot m$, L 是导线长度, A 是导线的横截面积。

直流或低频情况下,在系统仿真中只使用直流损耗就足够了。但是,随着频率的升高,受频率变化影响明显的趋肤效应将占主要地位,即当高频电流流经导线时,大部分电流将集中在一个厚度等于趋肤深度的环面中,趋肤效应使得导体有效面积减小,从而使导体的等效电阻增加。趋肤深度与电流频率、导体的电导率和磁导率都有关系^[8-9],其值为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (2)$$

式中: δ 为趋肤深度, f 为电流频率, μ_0 为金属导体的磁导率, σ 为金属导体的电导率。

由式(2)可以得出趋肤深度与频率的平方根成反比关系。

高频电流引起的集肤效应现象会导致导线的交流电阻变大,系统阻耗增加^[10-11]。对于图1所示的圆形导线,其直流电阻和直流电阻的计算公式分别为式(3)和式(4)。

直流情况下:

$$R = \frac{\rho L}{\pi r^2} \quad (3)$$

高频情况下:

$$R = \frac{\rho L}{\pi r^2 - \pi(\gamma - \delta)^2} \quad (4)$$

如果 $r \gg \delta$, 则式(4)可以变为:

$$R \cong \frac{\rho L}{2\pi r \delta} \quad (5)$$

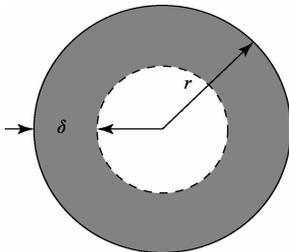


图 1 圆形导线截面

对于如图2所示的横截面为矩形的印制电路板(PCB)连接线,其直流电阻和直流电阻的计算公式分别为式(6)和

式(7)。

直流情况下:

$$R = \frac{\rho L}{\pi w t} \quad (6)$$

高频情况下:

$$R = \frac{\rho L}{2\delta t + 2\delta w} = \frac{\rho L}{2\delta(w + t)} \quad (7)$$

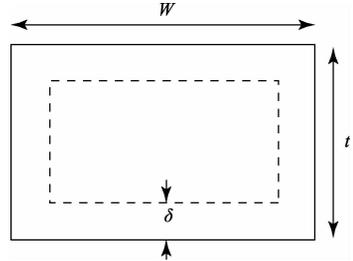


图 2 PCB连接线的横截面

由式(5)和式(7)可以看出,导线的电阻值与频率的平方根成正比,即随着频率的增加,导线的电阻值也在增加,频率越高,导线的电阻值越大,导线损耗越高。

下面将利用电磁场仿真软件 Ansoft Maxwell 分别对单根圆形导线和 PCB(印制电路板)上矩形导线进行仿真以进一步更为直观的说明趋肤效应,通过不同频率下的仿真,也可以验证趋肤深度与频率的关系。

3 软件介绍

Ansoft Maxwell 是世界著名的电磁场分析仿真软件,它基于麦克斯韦方程组,采用有限元离散算法,将工程中的电磁场计算转变为庞大的矩阵求解,具有计算快捷、结果准确的特点,能够很灵活地建立模型和设置各种求解参数,有广阔的适用性,特别适合几何或物理条件比较复杂的问题。

Ansoft Maxwell 在工业界的应用已经超过 30 年,它以其在有限元网格自适应剖分技术上的独创性,为工程师进行创造性的设计提供了有力的支持。其操作流程如图 3 所示。

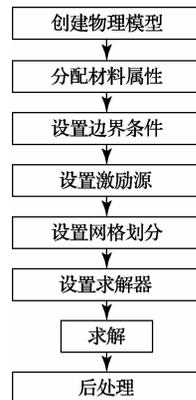


图 3 Ansoft Maxwell 操作流程

4 仿真分析结果

利用 Ansoft Maxwell 软件分别对圆形导线和 PCB 上矩形连接线进行建模、仿真,得到导线横截面的趋肤效应仿真效果图,如图 4~7 所示。其中该圆形导线为 20# 规格的实心裸线,导线半径为 0.040 64 cm(16mil),导线的材质为铜,忽略导线的介质绝缘层,并假设各介质均匀、各向同性。PCB 上的矩形导线为厚度为 16.5 μm ,宽度为 40 μm ,材质为铜的微带线。从图中可以明显看出,受趋肤效应的影响,在导线横截面上越靠近边缘处电流密度越大。

图 4 和图 5 分别是 10 MHz 和 50 MHz 时圆形导线横截面上的电流密度分布情况,图 6 和图 7 分别是 10 MHz 和 50 MHz 时矩形导线横截面上的电流密度分布情况。分别对比图 4 和 5 及图 6 和图 7,可以发现随着频率的升高,导线横截面上的电流分布越集中在导线的边缘处,即趋肤深度越来越小,电流沿导线流通的有效面积越小,因而导线的电阻损耗也就越大。

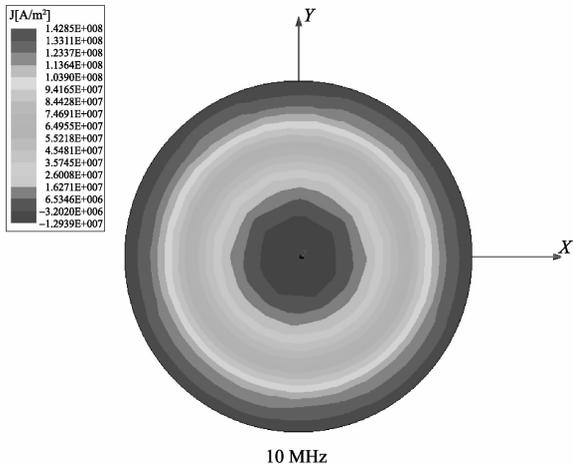


图 4 圆形导线横截面电流分布(10 MHz)

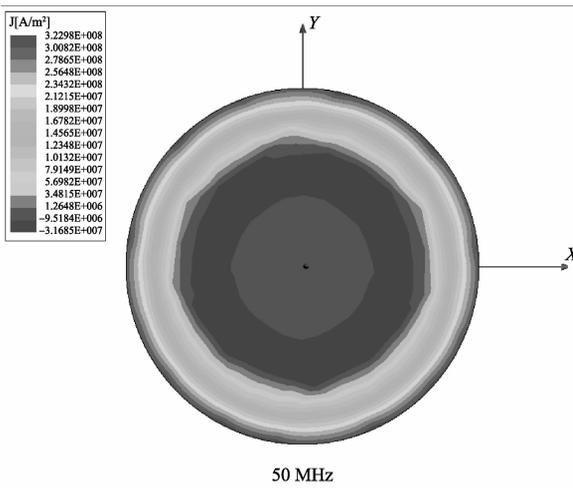


图 5 圆形导线横截面电流分布(50 MHz)

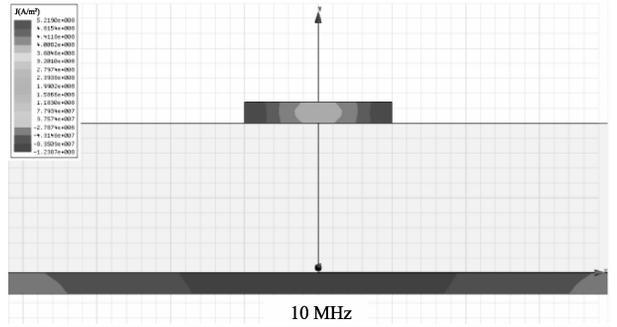


图 6 矩形导线横截面电流分布(10 MHz)

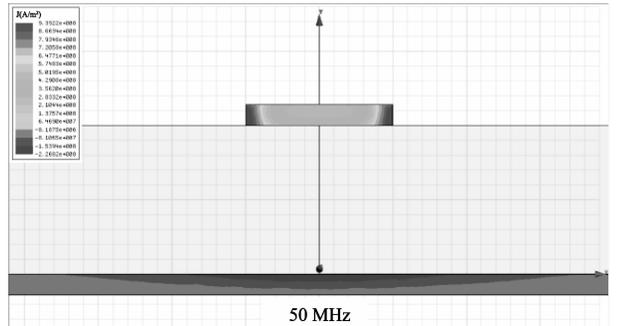


图 7 矩形导线横截面电流分布(50 MHz)

5 结 论

随着系统频率的提高,受趋肤效应的影响,传输线横截面内电流密度的分布与直流时平均分布的情况截然不同,越靠近边缘处,电流密度越大,因而导线的阻抗越大,导线的电阻损耗也就增大。利用 Ansoft Maxwell 软件可以非常方便的仿真导线截面的电流密度分布情况,为工程人员更直观的理解趋肤效应以及研究趋肤效应对导线阻抗的影响提供了帮助。

参考文献

- [1] 张小林,徐精华. 趋肤效应下传输线高频交流电阻的分析[J]. 江西科学,2008,26(6): 873-875.
- [2] 胡冰,张晓峰. 用有限元方法计算矩形母线的集肤效应[J]. 低压电器,2005,(3): 7-9,16.
- [3] 梁永春,柴进爱,李彦明,等. 有限元法计算交联电缆涡流损耗[J]. 高电压技术,2007,33(9): 196-199.
- [4] 陈清伟,邱望标,陈伟兴. 基于 ANSYS 的集肤效应分析[J]. 贵州科学,2012,30(1): 58-62.
- [5] 李建兵,牛忠霞,周东方,等. 矩形截面长导体趋肤效应的数值分析[J]. 信息工程大学学报,2006,7(2): 167-171.
- [6] 徐国闯,李东新. 高速信号传输中的新材料特性仿真与预测[J]. 国外电子测量技术,2011,30(6): 9-12.
- [7] 张建永,贾云涛,岳伟. 一种测量脉冲大电流的改进分流器设计[J]. 电子测量技术,2013,36(6): 25-28.
- [8] 胡晓秋,倪陶,田莉兰. 金属铁丝的趋肤效应的实验研

- 究[J]. 内江师范学院学报, 2013, 28(8): 32-34.
- [9] 鲁百佐. 载流导线等效电阻与频率关系研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2002, 30(4): 64-66.
- [10] 吴德会, 游德海, 柳振凉, 等. 交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 327-336.

- [11] 张琪, 张俊, 黄苏融, 等. 集肤效应对高密度永磁电机温升的影响[J]. 电机与工程应用, 2013, 40(8): 35-39.

作者简介

卢秋朋, 1978 年出生, 工程师。主要研究方向为电梯检验及电磁兼容技术研究。

E-mail: 13752674177@139.com

(上接第 26 页)

4 结 论

给出一种磁编码器的设计方法, 根据巨磁阻传感器输出的电压信号与查表的方式求解编码器角度信息, 其硬件电路设计比较简单, 降低了生产成本, 且编码器体积较小, 测量精度高达 12 位, 抗恶劣环境能力较强, 能够应用在工业检测和控制领域以及环境恶劣的特殊场所。可以通过修改 STM32 控制器的程序代码无需修改硬件可以实现磁编码器绝对式和增量式的测量输出方式。

参考文献

- [1] 齐荔荔, 万秋华. 图像式光电编码器的测角技术及其硬件实现 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 04120011-041200110.
- [2] 齐荔荔, 万秋华. 高分辨力面阵图像式光电编码器的测角技术[J]. 仪器仪表学报, 2003, 34(1): 234-239.
- [3] 刘易鑫, 魏彪, 郑徐豪, 等. 一种基于 MCU 的自动扶梯测量仪设计和实现[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(8): 35-39.
- [4] 杜颖财, 王希军, 王树洁, 等. 增量式编码器自动检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(11): 993-998.
- [5] 江晓军, 瞿丹晨, 徐洁. 一种角位移测量仪的研

制[J]. 电子测量技术, 2010, 33(2): 38-40.

- [6] 冯英翹, 万秋华. 小型光电编码器细分误差校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1374-1379.
- [7] LEE H B, LEE J H, LEE S J, et al. A study on 13bit rotary encoder of serial communication output using single bipolar magnet and detecting a displacement of singleturn and multiturn [C]. 2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). 2011: 637-639.
- [8] 曾一凡, 曹春琴. 单对磁极磁编码器的信号获取方案[J]. 仪表技术与传感器, 2011(3): 6-8.
- [9] 于非, 赵继敏, 罗响. 磁编码器算法分析与研究[J]. 微特电机, 2011, 10: 20-24.
- [10] XU Z H, WANG S C, CHIN T S, et al. Multi-pole fine magnetic scale for high-resolution magnetic encoders evidenced by a simplified method [J]. Microsystem Technologies, 2014, 20(8-9): 1491-1496.

作者简介

朱礼尧, 工学博士, 讲师。主要研究方向为传感器信号检测与信号处理, 嵌入式系统应用等。

E-mail: zly@hdu.edu.cn