

文章编号: 1000-8608(2018)04-0422-06

基于阻抗边界法的变压器杂散损耗计算与分析

赵志刚*, 郭莹, 魏鹏, 刘佳, 尹赛宁, 杨凯

(河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300132)

摘要: 为研究变压器结构件中的杂散损耗问题, 基于 Problem 21 基准族中的 P21-B 模型进行了详细实验研究和仿真分析。采用测量与仿真结合法对不同激励电流导磁钢板中的杂散损耗进行了测量分析, 并且针对现有测量方法的不足, 引入温度系数因子对其进行修正, 得到了更为准确的杂散损耗测量结果; 同时, 借助工程电磁场数值计算软件 MagNet, 分别采用传统有限元法和有限元与阻抗边界结合法对该模型进行仿真计算。通过对比分析, 发现相较于传统有限元法, 有限元与阻抗边界结合法在得到较为准确的损耗结果的同时, 还能减少计算成本, 节省计算资源, 更适合工程应用, 所得结论和结果有助于通过优化设计提高变压器的性能指标。

关键词: 杂散损耗; 精细建模; 温度影响; 有限元法; 阻抗边界法

中图分类号: TM4

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201804013

0 引言

随着特高压输电系统的迅速发展, 变压器的电压等级和安装容量不断提高, 变压器的漏磁场强度逐渐增加。漏磁场进入变压器油箱、铁心拉板、铁心夹件等结构件中, 导致变压器杂散损耗值增加, 对大型电力变压器而言, 杂散损耗占据了总损耗的 30%~40%, 成为变压器损耗中举足轻重的部分。此外, 杂散损耗的增加, 可能引起不能允许的局部过热, 使变压器的使用寿命降低, 影响变压器的传输效率和安全稳定运行, 对电网造成不可逆的影响^[1-5]。因此, 研发人员从变压器的结构、工艺和材料等方面对变压器进行改进, 达到降低漏磁场强度的目的。有效改进变压器性能的根本在于研究和分析漏磁场和杂散损耗的分布规律, 从而寻找出可降低结构件漏磁的优化设计方案。

对于电气工程中的杂散损耗问题, 在实验研究和数值仿真中都是一个复杂的经典难题。在实验研究方面, 杂散损耗总是和其他损耗混合在一起, 很难将构件中的杂散损耗从总损耗中分离开来^[6]。传统变压器结构件杂散损耗测量, 普遍采用负载损耗总测量值减去空载绕组损耗测量值的方

法, 其中负载损耗总测量值为绕组损耗与结构件损耗之和^[7-8], 该方法忽略了结构件对漏磁场的影响。近些年来, 国内学者对传统方法进行了改进, 提出了一种测量与仿真结合法, 即负载损耗总测量值减去负载绕组损耗计算值, 从而可得到变压器结构件的杂散损耗^[9-10], 尽管在传统测量方法上有所改进, 但却忽略了温度的影响。在仿真计算方面, 大多采用有限元方法对其进行计算, 为满足精度要求, 需考虑集肤效应等因素, 对其进行剖分和分层设置, 设置过于精细, 会导致仿真时间长, 计算成本增加, 并不适合工程应用。

本文基于 P21-B 模型, 利用电磁场数值计算软件 MagNet, 引入一个温度系数因子, 提出一种改进的测量与仿真结合法; 此外对于计算变压器结构件上的杂散损耗, 分别采用传统有限元法和有限元与阻抗边界结合法对模型进行仿真计算, 对两种方法得到的结果进行对比, 并分析各自的优缺点。

1 实验模型与原理

1.1 实验模型

TEAM Problem 21 是以变压器油箱、构件中

收稿日期: 2017-12-10; 修回日期: 2018-05-28。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51107026, 51677052, 51237005)。

作者简介: 赵志刚*(1981-), 男, 博士, E-mail: zhaozhigang@hebut.edu.cn; 郭莹(1993-), 女, 硕士生, E-mail: 2427519546@qq.com。

的杂散损耗问题为研究背景的^[7]. 本文基于 P21-B 模型对工频(50 Hz)激励电流下导磁钢板中的杂散损耗进行研究.

P21-B 模型示意图如图 1 所示, 包含作为激励源的绕组和导磁钢板结构件, 其中绕组由 2 个规格相同、匝数为 300 匝的导线反向绕制而成, 本研究为增大漏磁场强度, 两绕组施加反向激励电流; 导磁钢板牌号为 Q235B, 规格为 520 mm × 360 mm × 10 mm.

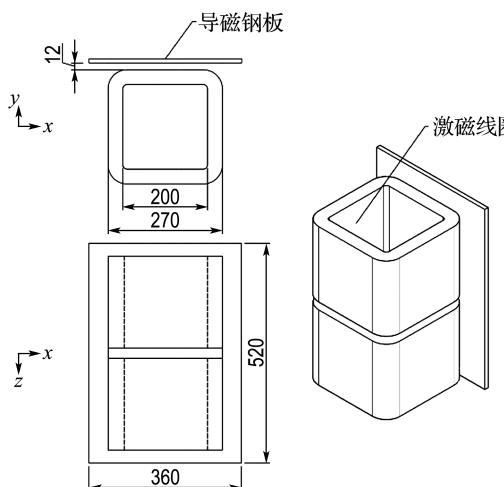


图 1 P21-B 模型示意图

Fig. 1 Structure chart of model P21-B

1.2 实验原理

1.2.1 结构件杂散损耗测量方法

(1) 传统测量方法

变压器结构件中的杂散损耗, 传统计算方法如下式所示:

$$P_{m-str} = P_{m-load} - P_{m-no} \quad (1)$$

式中: P_{m-str} 为变压器结构件中的杂散损耗, P_{m-load} 是负载损耗总测量值, P_{m-no} 是空载绕组损耗测量值.

而负载条件下, 模型的损耗总测量值可表示为

$$P_{m-load} = P_{m-str} + P_{m-coil} \quad (2)$$

式中: P_{m-coil} 为负载绕组损耗测量值.

由于导磁钢板磁导率远大于空气磁导率, 在负载工况下, 导磁钢板结构件加入, 定会导致空间漏磁场的分布改变, 造成负载和空载绕组损耗值的不一致, 即 $P_{m-no} \neq P_{m-coil}$, 从而影响变压器结构件中杂散损耗的准确分离^[8-9].

(2) 测量与仿真结合法

针对上述变压器结构件中杂散损耗测量问题, 国内学者已提出了一种测量与仿真结合法, 如

下式所示:

$$P_{m-str} = P_{m-load} - P_{c(20)-coil} \quad (3)$$

式中: $P_{c(20)-coil}$ 为标准温度 20 ℃下, 负载绕组损耗计算值.

(3) 改进的测量与仿真结合法

现有的一些电磁场数值计算软件, 给定的材料属性都为标准温度 20 ℃时的参数值. 因此, 软件后处理所得到的绕组损耗计算结果也为标准温度下的绕组损耗计算值. 绕组由铜线绕制而成, 受温度影响严重, 本文引入温度系数因子^[11], 对绕组损耗计算值进行修正, 如下式所示:

$$P_{c-coil} = P_{c(20)-coil} \frac{234.5 + \theta}{234.5 + 20} \quad (4)$$

式中: P_{c-coil} 为实际温度下, 负载绕组损耗计算的折算值; θ 为绕组实际温度.

$$P_{m-str} = P_{m-load} - P_{c-coil} \quad (5)$$

综合式(4)和(5), 变压器杂散损耗的测量值表示为

$$P_{m-str} = P_{m-load} - P_{c(20)-coil} \frac{234.5 + \theta}{234.5 + 20} \quad (6)$$

1.2.2 阻抗边界法 阻抗边界法是基于电磁波理论, 将导体阻抗边界作为一种边界条件进行有限元求解的方法. 由于导磁钢板结构件中的漏磁场透入深度非常小, 可忽略导体内的反射波; 其透入深度远小于箱壳或结构件的厚度, 保证导磁钢板平面仅有法向磁通发生变化, 符合阻抗边界法的适用条件^[12-13].

变压器油箱的广义波动方程可表示为

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = j\omega\mu\sigma H \quad (7)$$

结合电磁场基本方程

$$\nabla \times H = \sigma E \quad (8)$$

可得关于 E 的方程:

$$E = -\frac{1}{\sigma} \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{(1+j)\sqrt{\omega\sigma\mu/2}}{\sigma} H = ZH \quad (9)$$

式中: H 为磁场强度; ω 为角频率; μ 为磁导率; σ 为电导率; $Z = \frac{1+j}{\delta\sigma}$ 为表面阻抗, δ 为透入深度.

2 测量与仿真

2.1 空载绕组损耗计算

本文基于 P21 绕组模型, 采用整体建模和扁导线精细建模两种方式, 如表 1 所示, 对工频激励下的绕组损耗进行研究, 以寻求一种可以准确计算变压器绕组损耗的建模方式.

表 1 绕组建模方式
Tab. 1 The method of winding modeling

建模方式	线圈类型	导线截面积/mm ²	横截面	绕组匝数/匝	电流分布	涡流损耗
整体建模	Stranded	13.04		300	均匀	不考虑
扁导线精细建模	Solid	13.04		1	非均匀	考虑

整体建模是工程上常用的一种绕组简化建模方式^[4-15],在仿真计算时,仅需设置线圈导线的有效截面积和匝数;而扁导线精细建模,是以实际裸铜线的横截面为构造面进行建模的。两种绕组计算模型如图 2 所示。

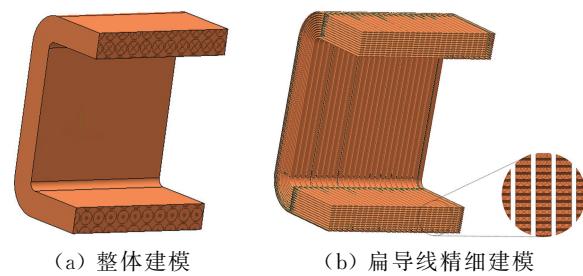


图 2 绕组仿真模型

Fig. 2 Winding simulation model

本文运用三相柱式调压器对工频激励电流下绕组损耗进行测量和仿真计算,所得结果如图 3 所示。

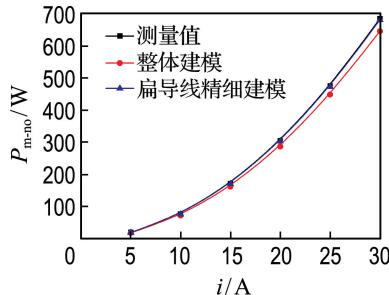


图 3 不同激励电流下空载绕组损耗结果

Fig. 3 Loss result of no-load winding under different exciting currents

可以得出,传统简化建模由于忽略绕组涡流损耗等影响因素,和实际线圈绕组测量值存在一

定误差;而扁导线精细建模,考虑了绕组的涡流损耗和集肤效应影响,与实际测量结果较为吻合。

2.2 负载绕组损耗计算

综上对空载绕组损耗的计算分析,为得到准确的负载绕组损耗计算值,需采用扁导线精细建模方式。为验证负载工况下建模方式的有效性,采用 F. W. Bell 公司的高斯计 (Model 8010 Gaussmeter) 对导磁钢板表面(空气中的)法向漏磁通密度进行了测量,如图 4 所示,沿绕组轴线方向(z 方向)共设有 25 个测试点,高斯计探头厚度为 1.52 mm,霍尔元件中心为 0.76 mm,因此测量点位于结构件上表面 0.76 mm 处 ($x = -0.76$ mm)。本文对图 4 所示位置处的磁通密度进行比较,所得不同激励下的磁通密度分布如图 5 所示。

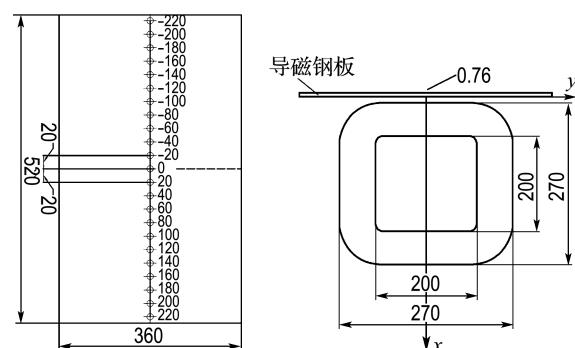
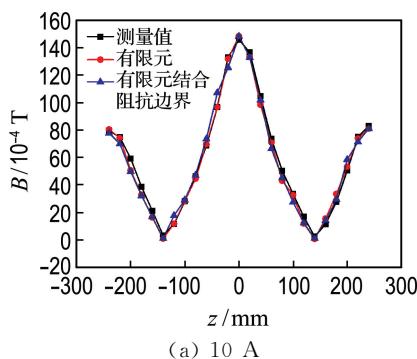


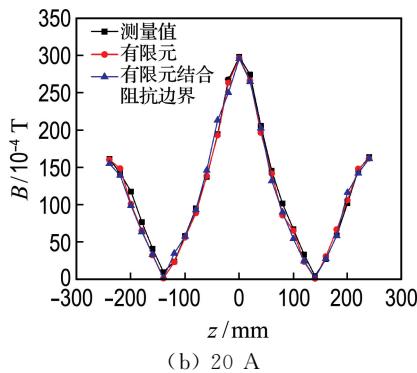
图 4 导磁钢板磁通分布测量点

Fig. 4 Measuring point of magnetic flux distribution in magnetic steel plate

由图 5 可以看出:导磁钢板表面处的磁通密度分布测量值和计算值近似相等,验证了建模的有效性,从而得到准确的负载绕组损耗计算值,为测量与仿真结合法提供了数据支持。



(a) 10 A



(b) 20 A

图 5 导磁钢板空间磁通密度分布
($x = -0.76 \text{ mm}$)Fig. 5 Magnetic flux density distribution in magnetic steel plate ($x = -0.76 \text{ mm}$)

2.3 导磁钢板结构件损耗

本文分别采用传统测量法、测量与仿真结合法(MEA+SIM)以及改进的测量与仿真结合法(改进 MEA+SIM)对变压器导磁钢板结构件进行测量,所得结果如表 2 所示。通过对数据的对比分析,发现采用测量与仿真结合法,相较于传统测量法,测量精度有所提高,但仍存在一定差距,而引入温度系数因子得到的改进的测量与仿真结合法,可以获得更为准确的导磁钢板杂散损耗的测量结果,因此,本文采用改进的测量与仿真结合法作为实验测量值。

对于变压器导磁构件的杂散损耗仿真计算,基于工程电磁场数值计算软件 MagNet,分别采用传统有限元法(FEM)和有限元与阻抗边界结合法(FEM+IB)对模型杂散损耗进行计算,所得结果如表 3 所示。

由表 3 分析可得:传统有限元法和有限元与阻抗边界结合法所得损耗结果误差均在 4% 以内,满足工程所需的精度要求。

本文还对两方法的网格数和求解时间进行了

对比,所得数据如表 4 所示。

表 2 导磁钢板杂散损耗测量值

Tab. 2 Measured value of stray loss in magnetic steel plate

电流/A	测量值/W			计算值/W
	传统法	MEA+SIM	改进 MEA+SIM	
5	4.18	4.02	3.79	3.77
10	15.42	14.94	13.82	14.34
15	33.46	32.02	29.63	31.40
20	59.02	56.14	53.45	54.89
25	93.50	86.96	84.97	84.81
30	137.45	132.14	127.55	121.30

表 3 导磁钢板杂散损耗计算值

Tab. 3 Calculated value of stray loss in magnetic steel plate

电流/A	测量值/W	计算值/W	
		FEM	FEM+IB
5	3.79	3.77	3.52
10	13.82	14.34	13.52
15	29.63	31.40	29.80
20	53.45	54.89	51.83
25	84.97	84.81	79.62
30	127.55	121.30	113.42

表 4 网格剖分数与求解时间

Tab. 4 The number of mesh grid and the solution time

电流/A	网格数/个		求解时间/s	
	FEM	FEM+IB	FEM	FEM+IB
5	11 577 686	11 403 573	10 337	2 674
10	11 577 686	11 403 573	7 962	1 991
15	11 577 686	11 403 573	8 625	1 939
20	11 577 686	11 403 573	10 239	2 762
25	11 577 686	11 403 573	8 325	2 205
30	11 577 686	11 403 573	7 796	2 330

通过表 4 对比发现,传统有限元法为保证求解结果的准确性,需要对模型进行分层加密处理,网格数较多,而有限元与阻抗边界结合法不需对结构件进行分层剖分处理,不受频率和集肤效应的影响,操作较为简单,并可减少 70%~80% 的求解计算时间,减少计算成本,节省计算资源,更适于工程应用。

由图 6 磁通密度云图对比可以看出,两方法所得到导磁钢板表面的磁通密度分布基本相同,

表明采用有限元与阻抗边界结合法计算导磁钢板杂散损耗的有效性。

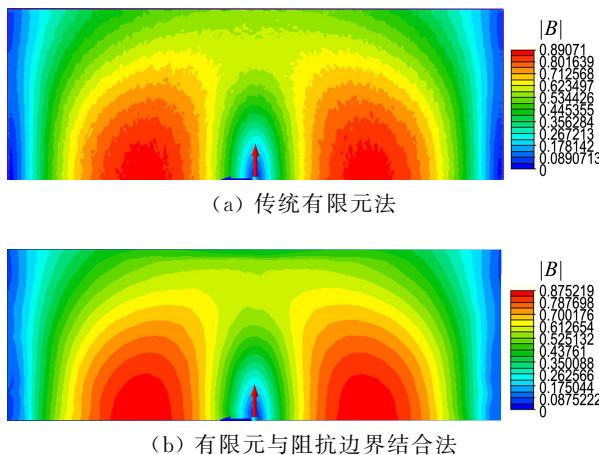


图 6 导磁钢板表面磁通密度云图

Fig. 6 Shaded plot of magnetic flux density on surface of magnetic steel plate

3 结 论

(1) 采用可以考虑绕组涡流损耗和集肤效应的扁导线精细建模方式, 能得到更为准确的绕组损耗计算结果。

(2) 引入温度系数因子得到改进的测量与仿真结合法, 可以获得更为准确的导磁钢板的杂散损耗测量结果。

(3) 传统有限元法和有限元与阻抗边界结合法相比, 在满足计算精度要求的同时, 有限元与阻抗边界结合法可降低有限元网格数, 大幅度减少计算成本, 节约计算时间, 更适合工程应用。

参考文献:

- [1] 额尔和木巴亚尔, 李 岩, 孙 昕, 等. 电力变压器三维涡流场计算与屏蔽问题分析 [J]. 高压电器, 2011, 47(10):69-74.
Eerhemubayaer, LI Yan, SUN Xin, et al. Calculation of 3D eddy current field and analysis of shielding in power transformer [J]. **High Voltage Apparatus**, 2011, 47(10):69-74. (in Chinese)
- [2] 韩芳旭. 换流变压器谐波损耗及热问题的计算与分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
HAN Fangxu. Calculation and analysis of harmonic loss and thermal problems on converter transformer [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] 朱占新, 谢德馨, 张艳丽. 大型电力变压器三维漏磁场与结构件损耗的时域分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9):156-160.
ZHU Zhanxin, XIE Dexin, ZHANG Yanli. Time domain analysis of 3D leakage magnetic fields and structural part losses of large power transformers [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2012, 32(9):156-160. (in Chinese)
- [4] 井永腾. 电力变压器涡流场及热问题计算与分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
JING Yongteng. Computation and analysis of power transformer on eddy current field and hot question [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [5] TUROWSKI J, PELIKANT A. Eddy current losses and hot-spot evaluation in cover plates of power transformers [J]. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, 1997, 144(6):435-440.
- [6] 程志光, 高桥则雄, 博扎德·弗甘尼, 等. 电气工程电磁热场模拟与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
CHENG Zhiguang, TAKAHASHI Norio, FORGHANI B, et al. **Electromagnetic and Thermal Field Modeling and Application in Electrical Engineering** [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [7] 程志光, 刘 涛, 范亚娜, 等. 基于 TEAM P21 三维杂散场问题建模仿真与验证 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(9):194-203.
CHENG Zhiguang, LIU Tao, FAN Yana, et al. TEAM P21 based validation of 3D stray-field modeling and simulation [J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2014, 29(9):194-203. (in Chinese)
- [8] KULKARNI S, OLIVARES J C, ESCARELA-PEREZ R, et al. Evaluation of eddy current losses in the cover plates of distribution transformers [J]. **IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology**, 2004, 151(5):313-318.
- [9] 赵志刚, 刘福贵, 程志光, 等. HVDC 直流偏磁电力变压器铜屏蔽中涡流损耗分析与仿真 [J]. 高电压技术, 2011, 37(4):990-995.
ZHAO Zhigang, LIU Fugui, CHENG Zhiguang, et al. Eddy-current loss of copper shielding under DC-biased condition in HVDC [J]. **High Voltage Technology**, 2011, 37(4):990-995.

- Engineering, 2011, **37**(4):990-995. (in Chinese)
- [10] 范亚娜, 刘洋, 马光, 等. 电力变压器两种磁屏蔽中磁通及损耗的仿真分析与验证[J]. 电工电能新技术, 2015, **34**(7):32-36, 52.
- FAN Yana, LIU Yang, MA Guang, et al. Analysis and validation of flux and iron loss inside two kinds of magnetic shielding of power transformer [J]. **Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy**, 2015, **34**(7):32-36, 52. (in Chinese)
- [11] LOUKILI A, CHOPIN D, KHELIDJ A, et al. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history [J]. **Cement and Concrete Research**, 2000, **30**(6):915-922.
- [12] 刘华, 刘锐, 付洋洋, 等. 基于阻抗边界法的换流变压器箱壳谐波损耗计算[J]. 高电压技术, 2015, **41**(9):3171-3176.
- LIU Hua, LIU Rui, FU Yangyang, et al. Calculation of harmonic loss in converter transformer tank shells based on the impedance boundary condition [J]. **High Voltage Engineering**, 2015, **41**(9):3171-3176. (in Chinese)
- [13] 李茉. 基于阻抗边界法的变压器箱壳涡流损耗计算[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- LI Mo. Calculation of eddy current loss in transformer tank shells based on the impedance boundary condition [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [14] CHENG Zhiguang, BEHZAD F, LIU Yang, et al. Magnetic loss inside solid and laminated components under extreme excitations [J]. **International Journal of Energy and Power Engineering**, 2016, **5**(1):21-30.
- [15] 王建民, 周文涛. 大型电力变压器漏磁场及附加损耗的研究[J]. 华北电力大学学报, 1997, **24**(1):17-22.
- WANG Jianmin, ZHOU Wentao. Finite element analysis of stray field and additional loss in large power transformer [J]. **Journal of North China Electric Power University**, 1997, **24**(1):17-22. (in Chinese)

Calculation and analysis of stray loss of transformer based on impedance boundary method

ZHAO Zhigang*, GUO Ying, WEI Peng, LIU Jia, YIN Saining, YANG Kai

(State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,
Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China)

Abstract: In order to study the stray loss of transformer, detailed experimental research and simulation analysis are carried out based on the P21-B model of Problem 21 benchmark family. A method of combining measurement with simulation is used to measure stray loss in magnetic steel plate under different current excitations. According to the deficiency of the existing measurement methods, the temperature coefficient factor is introduced to the correction, and the more accurate stray loss measurement results are obtained. The traditional finite element method and a method of finite element combined with impedance boundary are used to simulate the model by using engineering magnetic field numerical calculation software MagNet. Through comparative analysis, it is found that the method of finite element combined with impedance boundary can obtain accurate loss results, reduce the computational cost, save the computational resources, and be more suitable for the engineering application. The conclusions and results are helpful to improve the performance index of the transformer through the optimization design.

Key words: stray loss; accurate modeling; temperature effect; finite element method; impedance boundary method