

数据驱动下磁性元件的磁芯损耗建模

宋红果

青岛大学数学与统计学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年3月8日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月10日

摘要

为实现磁性元件高效率、高功率密度的设计目标, 深入探究其损耗特性是关键前提。本文以四种不同磁芯材料为研究对象, 系统分析了磁芯损耗的关键影响因素。研究首先将磁通密度数据视为波形信号, 提取其时域与频域特征, 与原始数据中的温度、频率等变量共同构建特征集, 建立XGBoost磁芯损耗回归模型。接下来基于经典的磁芯损耗模型斯坦麦茨方程, 增加温度因素, 并将其以幂指数形式引入, 显著提高了磁芯损耗预测效果。最后通过方差分析探讨温度、励磁波形以及磁芯材料对磁芯损耗的独立影响和两两交互作用, 并根据Tukey HSD事后检验结果, 分析不同温度、励磁波形和材料组别之间的具体差异, 找出影响损耗的主要驱动因素。

关键词

磁芯损耗, XGBoost, 斯坦麦茨方程, 方差分析

Magnetic Core Loss Modeling of Magnetic Components under Data-Driven Conditions

Hongguo Song

School of Mathematics and Statistics, Qingdao University, Qingdao Shandong

Received: March 8, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 10, 2026

Abstract

To achieve the design goals of high efficiency and high power density in magnetic components, a thorough investigation of their loss characteristics is a crucial prerequisite. Taking four different core materials as the research objects, this paper systematically analyzes the key factors affecting core loss. First, the magnetic flux density data are treated as waveform signals, and their time-domain and frequency-domain features are extracted. These features are then combined with

variables such as temperature and frequency from the original data to construct a feature set, based on which an XGBoost regression model for core loss is established. Next, based on the classical core loss model, namely the Steinmetz equation, a temperature factor is incorporated in the form of a power exponent, which significantly improves the prediction performance of core loss. Finally, analysis of variance is employed to investigate the independent effects of temperature, excitation waveform, and core material on core loss, as well as their pairwise interaction effects. Based on the results of the Tukey HSD post hoc test, the specific differences among different temperature levels, excitation waveforms, and material groups are further analyzed to identify the major driving factors affecting core loss.

Keywords

Core Loss, XGBoost, Steinmetz Equation, ANOVA

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着半导体技术的不断进步,功率变换器产品的研发方向逐渐向高频、高功率密度发展,磁性元件在功率变换器中起着至关重要的作用,为了保证磁性元件的高效率,除了满足磁性元件的电气参数可行性,还必须确保其损耗尽可能小。因此,深入研究和分析磁性元件的损耗特性显得尤为重要。

磁性元件的损耗主要包括绕组损耗和磁芯损耗[1],铜导体的绕组损耗可以通过电磁场有限元仿真技术进行准确计算,而磁芯损耗由高频交变磁通作用产生,表现出复杂的非线性和相互关联性。目前,磁芯损耗模型主要可分为损耗分离模型和经验计算模型两大类[2][3]。损耗分离模型通过分别计算磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗等来求得总损耗,而经验计算模型则基于实验数据或理论推导出的经验公式来估算磁芯损耗。其中,最具代表性的经验计算模型是斯坦麦茨方程(Steinmetz Equation, SE)[4],但该模型的适用范围仅限于正弦波励磁,且不同磁芯材料和工作条件下,计算参数存在差异。相比于传统的经验计算模型,数据驱动方法在磁芯损耗预测中展现出更高的精度。Guillod等[5]提出一种结合3D有限元方法和人工神经网络的混合方法,显著提高了计算效率并减小了误差。Dogariu等[6]将迁移学习应用于磁芯损耗建模,以减少所需的数据量。上述数据驱动方法的数据和研究方法单一,本文在大量数据中提取特征,利用方差分析、支持向量机等多种方法建立模型,从不同的角度研究磁芯损耗,为后续相关研究提供了方法参考和实验基础。

2. 数据说明

数据集有4个数据表,分别表示来自4种不同磁芯材料所测的数据(由于磁芯材料的复杂性,仅用材料1、材料2、材料3、材料4来表示不同材料),4个数据表结构相同,其中:

第1列是温度,取4个值:25、50、70、90,单位:摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

第2列是频率,取值范围:50,000~500,000,单位:赫兹(Hz);

第3列是磁芯损耗,单位:每立方米瓦特(W/m^3);

第4列是励磁波形类型:正弦波、三角波和梯形波;

第5~1029列是磁通密度,共1024个采样点(一个周期时间内,相同间距采样),单位:特斯拉(T)。

3. 波形特征提取在损耗建模中的应用

3.1. 波形可视化

随机取出正弦波、三角波、梯形波的各 15 个实验结果，得到在一个时间周期内的磁通密度变化情况折线图(图 1)。可以看出，正弦波具有明显的中心对称性和连续性，每个波形在上升阶段和下降阶段分别具有相同的斜率，其变化是均匀的，正弦波的变化没有突变，从一个极值平滑过渡到另一个极值。三角波最显著特点是其线性上升和下降，形成尖锐的顶点，而且具有大致的对称性，上升时间和下降时间大致相等它具有尖锐的峰顶和谷底，这种特点可以使它精确控制信号的切换时刻。梯形波显示大致呈现中心对称性，由几个斜率不同的线性部分组成，从形状上看，它与三角波的尖锐顶点相似。

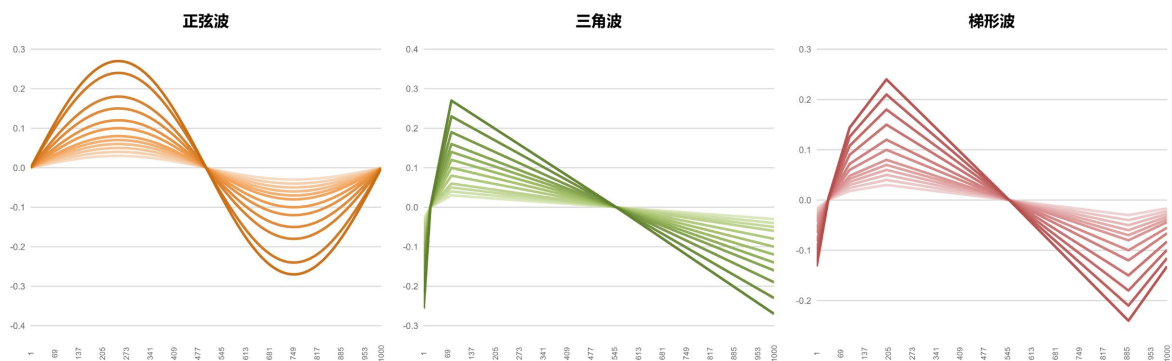


Figure 1. Sine wave (left), triangular wave (middle) and trapezoidal wave (right)

图 1. 正弦波(左)、三角波(中)和梯形波(右)

3.2. 特征提取

从两个方面对磁通密度时间序列数据进行了特征提取：(1) 时域特征：时域分析中，提取了时间序列的基础统计量，包括均值、标准差、峰值、极差、峰度和偏度。这些特征能够反映磁通密度随时间变化的集中趋势与波动情况。(2) 频域特征：通过快速傅里叶变换(FFT)，将时间序列转换至频域，提取了前五个主要频率分量的幅值。频域特征能够揭示磁通密度信号的周期性和频率分布情况，有助于理解信号中的主要振动模式及其在不同频率下的能量分布。

基于上述方法提取的时域特征与频域特征，不仅可用于区分不同励磁波形，更可作为磁芯损耗建模的重要输入变量。考虑到磁芯损耗不仅与频率、磁通密度峰值和温度有关，还受到波形陡峭程度、谐波成分和波形对称性等因素影响，本文将所提取的时频特征与原始数据中的温度、频率、磁通密度峰值、材料类别等变量共同构成损耗建模特征集，为后续回归模型提供输入。

3.3. 损耗回归建模

首先将数据随机分为训练集和验证集，样本数量比例为 8:2，然后用训练集数据训练多分类模型，用验证集数据评估分类模型的合理性和有效性。

接下来采用基于 XGBoost 的方法构建磁芯损耗回归模型，XGBoost 的目标函数可以表示为

$$\mathcal{L}(\theta) = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k)$$

其中 $l(y_i, \hat{y}_i)$ 表示损失函数，度量磁芯损耗真实值 y_i 和预测值 \hat{y}_i 之间的误差， $\Omega(f_k)$ 表示正则化项，用于控制模型的复杂度，避免过拟合。绘制在 XGBoost 方法下的实际与预测磁芯损耗对比图(图 2)，横轴表示

实际的磁芯损耗值，纵轴表示模型预测的磁芯损耗值，大多数蓝色点紧贴红色的理想预测线，这表明模型的预测与实际值非常接近，整体上表现良好，XGBoost 模型成功捕捉了数据中的模式，能够对磁芯损耗进行有效的预测，同时意味着提取的波形特征能够具有很好的表征能力。

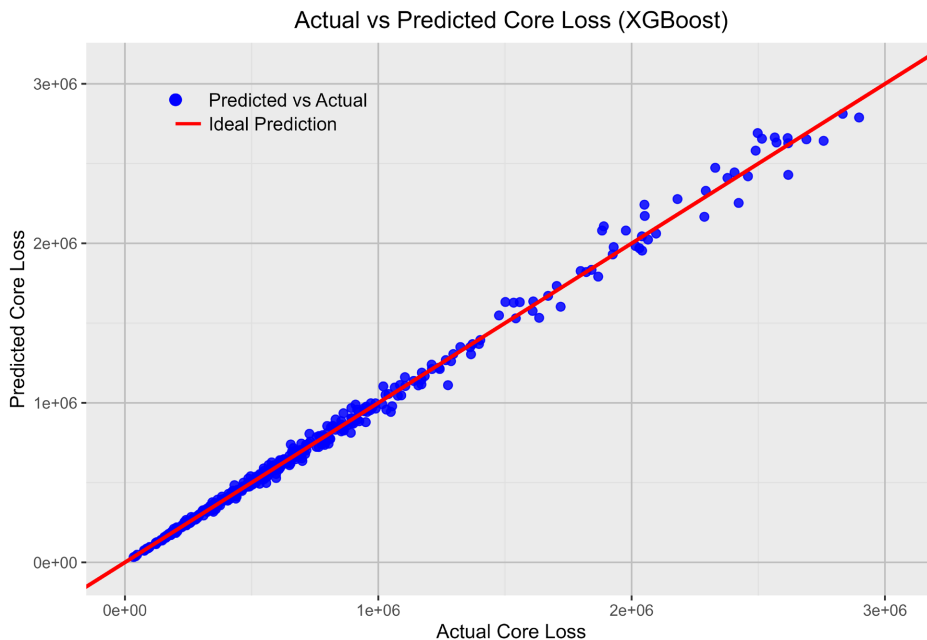


Figure 2. Prediction of core loss
图 2. 磁芯损耗预测图

4. 斯坦麦茨方程修正

斯坦麦茨方程(Steinmetz equation, SE)是一种经典的磁芯损耗模型，在正弦波励磁下，磁芯损耗计算公式为

$$P = k_1 \cdot f^{\alpha_1} \cdot B_m^{\beta_1}$$

其中 P 为磁芯损耗， f 是频率， B_m 是磁通密度峰值， k_1 、 α_1 和 β_1 是根据实验数据拟合的系数。然而，SE 方程的设计初衷是针对恒定条件下的正弦波形，对于不同种类的磁芯材料及工作温度的变化，SE 方程会造成较大的误差。本节将温度作为重要影响因素引入到模型中，显著提升了磁芯损耗的预测效果。

磁芯损耗可以根据磁芯损耗分离模型分为三部分：磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗，其中涡流损耗和磁滞损耗是磁芯损耗的主要部分，受二者和温度关系[7]-[10]的启发，基于两点考虑，提出修正模型，第一从建模形式上看，斯坦麦茨方程本身属于典型乘法幂律结构，将温度以幂函数形式引入后，模型在对数变换下可写为线性形式，便于参数估计与显著性检验。第二，从物理机制上看，温度对磁芯损耗并非简单加性影响，而是会同时作用于磁滞损耗、涡流损耗及剩余损耗等多个组成部分。对于涡流损耗而言，其大小与材料电阻率密切相关，而材料电阻率通常随温度升高而增大，因此涡流损耗往往呈下降趋势；对于磁滞损耗而言，温度变化会影响磁畴壁运动阻力、矫顽力及磁导率，从而改变磁化反转过程中的能量耗散。在本文所涉及的温度区间与工况范围内，这些温度效应的综合结果可近似表示为一个关于温度的经验幂律项。修正模型如下：

$$p = k * T^\gamma * f^\alpha * B_m^\beta$$

将温度 T 以幂指数形式引入到 SE 方程中, 其中 k 、 γ 、 α 和 β 表示根据实验数据拟合的数据。表 1 展示了用训练集数据得到的系数估计和 P 值。拟合结果 $\gamma = -0.398229$, 说明在其他变量保持不变时, 温度对磁芯损耗的净影响表现为负向, 即温度升高对应的损耗呈下降趋势。需要指出的是, 该指数并不是材料的普适物理常数, 而是当前数据样本、频率范围、磁通密度范围及材料体系共同作用下得到的经验参数, 其物理含义应理解为“温度对总损耗净效应的强弱与方向”。从数量级上看, γ 的绝对值小于 1, 表明温度影响是显著但相对温和的: 温度每增加 10%, 模型预测损耗约变化为原来的 $1.1^{-0.398229} \approx 0.963$, 即下降约 3.7%。

Table 1. Coefficient estimates

表 1. 系数估计值

系数	估计值	P 值
k	4.983865	<2e-16
α	1.457789	<2e-16
β	2.448138	<2e-16
γ	-0.398229	<2e-16

计算独立测试集上磁芯损耗的相对预测误差,

$$err = \frac{(p_{Pre} - p_{Mea})}{p_{Mea}}$$

其中 p_{Pre} 是预测值, p_{Mea} 是实测值, 得到 SE 的相对预测误差约为 0.299, 幂指数修正模型的相对预测误差约为 0.183, 验证了幂指数修正模型具有更为精准的预测效果。

5. 磁芯损耗模型

在磁性元件的设计与优化过程中, 温度、励磁波形以及磁芯材料是需要重点关注的三大因素。本节用方差分析评估这三者对磁芯损耗的主效应和交互效应, 具体而言, 使用了包含三因素及其两两交互作用的方差分析模型, 通过计算 F 统计量和 P 值, 评估每个因素及其交互项对磁芯损耗的显著性影响。结合事后检验(Tukey HSD), 进一步探索了具体组别之间的差异。这种多因素方差分析识别了在实验设计中显著影响磁芯损耗的关键因素, 并揭示了不同因素之间的复杂协同关系。磁芯损耗模型的数学表达式可以简写为

$$\begin{aligned} \text{磁芯损耗} \sim & C(\text{温度}) + C(\text{励磁波形}) + C(\text{材料}) + C(\text{温度}) * C(\text{励磁波形}) \\ & + C(\text{温度}) * C(\text{材料}) + C(\text{励磁波形}) * C(\text{材料}). \end{aligned}$$

通过比较组间变异和组内变异, 判断组别均值的差异是否大到足以认为它们来自不同的总体, 检验统计量为

$$F = \frac{SSB/df_1}{SSE/df_2}$$

其中 SSB 是组间平方和, SSE 是组内平方和。 df_1 和 df_2 分别表示组间、组内自由度。通过 F 统计量的大小以及对应的 P 值判断组间差异是否显著。当 P 值小于显著性水平 0.05 时, 拒绝原假设, 认为组间均值存在显著差异。

根据方差分析结果(表 2), 温度、励磁波形和材料都对磁芯损耗有显著影响, 同时, 励磁波形与材料

的交互效应极其显著，这表明选择适当的波形和材料组合对于优化磁芯损耗有着重要的意义。图 3 展示了励磁波形(其中正弦波记为“1”，三角波记为“2”，梯形波记为“3”)与材料之间交互作用的可视化结果。

Table 2. ANOVA results

表 2. 方差分析结果

影响因素	F 值	P 值
C(温度)	23.29	<2e-16
C(励磁波形)	300.66	<2e-16
C(材料)	107.44	<2e-16
C(温度)*C(励磁波形)	1.75	0.105
C(温度)*C(材料)	0.81	0.604
C(励磁波形)*C(材料)	15.64	<2e-16

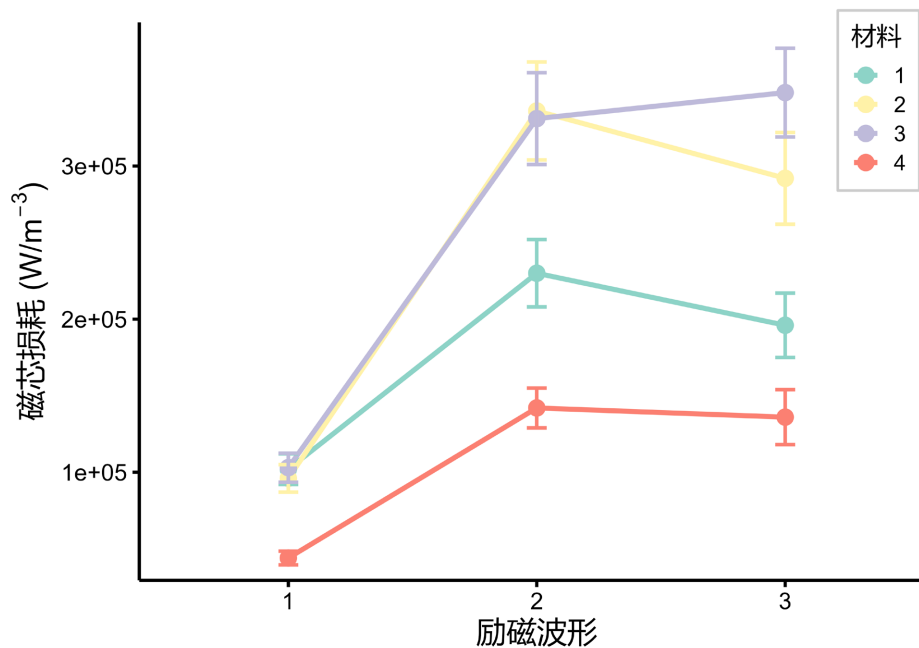


Figure 3. ANOVA results for the interaction effect of core materials and excitation waveforms on core loss

图 3. 材料和励磁波形对磁芯损耗的交互作用

为进一步明确不同温度、励磁波形及材料组别对磁芯损耗的具体影响，在单因素方差分析显著的基础上，采用 Tukey HSD 事后检验进行多重比较，得到表 3。可以看出，(1) 25°C 与其他温度(50°C, 70°C, 90°C)之间的磁芯损耗存在显著差异(P 值均小于 0.05)，这表明低温条件下的磁芯损耗显著小于较高温度下的损耗。然而，50°C 与 70°C 之间的差异未达到显著性水平(P=0.068)，表明在这一温度范围内磁芯损耗的变化较小。而 50°C 与 90°C 之间的差异显著(P = 0.0321)，进一步表明较高温度对损耗有显著的增加效应。70°C 与 90°C 之间没有显著差异(P = 0.9928)，表明在高温区间内温度的影响趋于平缓。(2) 波形 1 (如正弦波)与波形 2 (如三角波)、波形 3 (如梯形波)之间的差异显著，表明波形 1 对磁芯损耗的影响显著大于其他波形。然而，波形 2 与波形 3 之间的差异未达显著性水平(P=0.146)，表明这两种波形在磁芯损耗

方面的影响接近。(3) 材料 1 与材料 2、材料 3、材料 4 之间的损耗差异均达到显著性水平, 表明材料 1 在损耗方面与其他材料表现出显著不同的特征。此外, 材料 2 与材料 3、材料 4 之间的差异也显著, 尤其是材料 2 与材料 4 的差异最为显著。总体上, 所有材料组间的差异几乎都达到了显著水平, 说明材料的选择在优化磁芯损耗时具有关键作用。

Table 3. Tukey HSD post hoc test results
表 3. Tukey HSD 事后检验结果

Group1	Group2	P 值
25°C	50°C	0.002
25°C	70°C	<2e-16
25°C	90°C	<2e-16
50°C	70°C	0.068
50°C	90°C	0.032
70°C	90°C	0.993
正弦波	三角波	<2e-16
正弦波	梯形波	<2e-16
三角波	梯形波	0.146
材料 1	材料 2	<2e-16
材料 1	材料 3	<2e-16
材料 1	材料 4	<2e-16
材料 2	材料 3	0.016
材料 2	材料 4	<2e-16
材料 3	材料 4	0.022

6. 总结

本文基于四种不同磁芯材料的所测数据, 对磁芯损耗影响因素做了研究, 首先将磁通密度数据看做波形数据, 提取时域特征和频域特征, 分别利用支持向量机和随机森林方法建立励磁波形多分类模型, 在独立测试集上展现出极高的分类精度。接下来基于斯坦麦茨方程, 将温度以幂指数形式引入, 显著提高了磁芯损耗预测效果。最后通过方差分析探讨了温度、励磁波形以及磁芯材料对磁芯损耗的影响和交互作用, 并根据 Tukey HSD 事后检验结果, 分析不同温度、励磁波形和材料组别之间的具体差异, 找出影响损耗的主要驱动因素, 为磁性元件的设计提供了参考。需要注意的是, 本文在建模过程中假设了磁性元件的规则形状、匀质性等特征, 忽略了边缘效应等复杂因素, 在实际生产应用中可能与模型结果存在差异。因此, 后续研究可基于本文模型, 逐步放宽假设条件, 引入材料缺陷、边缘效应、温度耦合等实际影响因素, 通过实验测试与模型修正相结合的方式, 提升磁芯损耗模型的准确性与实用性, 使其更贴合实际生产应用需求, 为功率变换器中磁性元件的优化设计提供更可靠的理论支撑。

参考文献

- [1] 刘占磊, 祝令瑜. 基于 CNN-Bi LSTM 的铁氧体磁芯损耗精确模型和小样本迁移学习预测方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4487-4498.

-
- [2] Barg, S., Ammous, K., Mejri, H. and Ammous, A. (2017) An Improved Empirical Formulation for Magnetic Core Losses Estimation under Nonsinusoidal Induction. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **32**, 2146-2154. <https://doi.org/10.1109/tpel.2016.2555359>
- [3] 孟大伟, 肖利军, 孟庆伟. 考虑定子铁心片间短路时的涡流及涡流损耗的有限元分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 19-25.
- [4] Steinmetz, C.P. (1892) On the Law of Hysteresis. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, **IX**, 1-64. <https://doi.org/10.1109/t-aiee.1892.5570437>
- [5] Guillod, T., Papamanolis, P. and W. Kolar, J. (2020) Artificial Neural Network (ANN) Based Fast and Accurate Inductor Modeling and Design. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, **1**, 284-299. <https://doi.org/10.1109/ojpel.2020.3012777>
- [6] Dogariu, E., Li, H., Serrano Lopez, D., Wang, S., Luo, M. and Chen, M. (2021) Transfer Learning Methods for Magnetic Core Loss Modeling. 2021 *IEEE 22nd Workshop on Control and Modelling of Power Electronics (COMPEL)*, Cartagena, 2-5 November 2021, 1-6. <https://doi.org/10.1109/compel52922.2021.9646065>
- [7] Ferro, A., Montalenti, G. and Soardo, G. (1976) Temperature Dependence of Power Loss Anomalies in Directional Fesi 3%. *IEEE Transactions on Magnetics*, **12**, 870-872. <https://doi.org/10.1109/tmag.1976.1059112>
- [8] Xue, S., Chu, W.Q., Zhu, Z.Q., Peng, J., Guo, S. and Feng, J. (2016) Iron Loss Calculation Considering Temperature Influence in Non-Oriented Steel Laminations. *IET Science, Measurement & Technology*, **10**, 846-854. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2016.0112>
- [9] Chakrabarti, B.K. and Acharyya, M. (1999) Dynamic Transitions and Hysteresis. *Reviews of Modern Physics*, **71**, 847-859. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.71.847>
- [10] Ionel, D.M., Popescu, M., McGilp, M.I., Miller, T.J.E., Dellinger, S.J. and Heideman, R.J. (2007) Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **43**, 1554-1564. <https://doi.org/10.1109/tia.2007.908159>