

新型多相位多线圈激励感应加热电磁炉

张思彦¹, 陈 为¹, 林甲深²

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116;
2. 华能罗源发电有限责任公司, 福建 罗源 350601)

摘要:针对传统单线圈电磁炉加热过程中锅体温度难以均匀的问题,本文提出一种新型具有不同相位励磁的多线圈感应加热电磁炉,线圈间加载不同相位的电流,利用涡流邻近效应发热对温度的影响来提高锅具表面温度分布的均衡性,并且通过有限元法进行涡流场与温度场的双向耦合仿真。在保证锅具的涡流损耗和加热半径相同的情况下,分析比较了新型多相位多线圈电磁炉和传统单线圈电磁炉锅具表面涡流和温度分布,分析结果表明新型电磁炉能够实现更均匀的温度分布,为多相位多线圈电磁炉的设计提供了理论依据。

关键词: 感应加热; 电磁炉; 涡流; 温度分布

中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1003-3076(2016)02-0044-04

1 引言

随着电力电子技术的发展,感应加热技术日趋成熟,电磁炉作为感应加热的主要应用之一,以其高效、节能、环保和易控等优点逐渐取代传统的明火及电热盘加热而备受关注。电磁炉主要由加热线圈、控制电路和金属锅具组成,通以 20 ~ 40kHz 交变电流的加热线圈产生高频交变磁场,在金属锅具中感应出涡流,涡流产生损耗发热达到烹饪食物的目的^[1]。

过去几十年人们对电磁炉的研究主要集中在基本工作性能的提高上。文献[2]从效率、频率控制、电磁辐射以及开关管承受应力等方面对电磁炉常用的四种逆变电路(全桥谐振、半桥谐振、单管零电流开关和单管零电压开关)进行分析比较,得出了它们各自的优缺点;文献[3]分析比较了添加铁磁性平面前后电磁炉的加热性能,证明了铁磁性平面对电磁炉加热性能的提高具有明显的优势;文献[4]分析了感应加热线圈的电感和交流电阻,阐述了磁场变化对线圈电感和交流电阻的影响。近来,随着大功率商业电磁炉的应用和日益普及,电磁炉的加热问题日益凸显出来,如存在加热死角,发热过于集

中,加热不均匀,导致食物烧焦、锅具变形,因此电磁炉的均热问题得到关注。目前,市场上大多数技术采用增加低温度区域所对应的线圈匝数来改善温度分布的均衡性^[5],然而这种方法并不能完全满足人们均匀加热某一特定区域的需求。

相互靠近的线圈通有交变电流时,相邻线圈间感应出来的磁场会因线圈电流相位的不同而相互叠加或抵消,因此置于其上方的导体感应出来的涡流也相应地加强或减弱,而感应加热线圈的结构和尺寸在很大程度上影响着锅具表面涡流和温度分布^[6]。因此本文提出了一种具有不同相位励磁的多线圈电磁炉,以此来提高锅具表面温度分布的均衡性。与此同时,考虑到电磁感应加热的分析涉及到涡流场与温度场的非线性耦合问题,锅具的温度影响锅具材料的电导率和磁导率,电导率和磁导率又影响涡流的大小和分布,而且上述问题属于三维范畴,难以进行理论计算,因此本文采用有限元仿真软件对涡流场和温度场进行双向耦合仿真,在保证锅具的涡流损耗和加热半径相同的前提下,将新型多相位多线圈电磁炉和传统单线圈电磁炉锅具表面涡流和温度分布进行对比分析。仿真结果证明本文提出的新型多相位多线圈电磁炉能够提高温度分布

收稿日期: 2015-03-09
作者简介: 张思彦(1991-),女,福建籍,硕士研究生,研究方向为电力电子高频磁技术;
陈 为(1958-),男,福建籍,教授,博士,研究方向为电力电子高频磁技术。

的均衡性。

2 涡流场与热传导场的耦合有限元分析

麦克斯韦方程组是描述电磁场的数学模型,对于涡流场,可以推出以磁矢位 \mathbf{A} 为变量的表达式为^[7]:

$$\frac{1}{\mu_r \mu_0} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \tag{1}$$

式中, μ_r 为相对磁导率; μ_0 为真空中磁导率; σ 为电导率; \mathbf{J}_s 为激励电流。

求解方程式(1),可得出感应涡流 \mathbf{J} 为:

$$\mathbf{J} = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -j\omega\sigma\mathbf{A} \tag{2}$$

感应加热中,涡流所产生的焦耳热作为热源 Q_e , 其表达式为:

$$Q_e = \frac{|\mathbf{J}|^2}{\sigma} \tag{3}$$

对于热传导场,基于傅里叶热传导方程计算温度场,其表达式为:

$$\lambda \nabla^2 T - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -Q_e \tag{4}$$

式中, λ 为导热系数; c 为比热容; ρ 为物体的密度; T 为温度。

锅具表面因对流引起的热量损耗由傅里叶边界条件确定,其表达式为:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_s - T_a) \tag{5}$$

式中, h 为对流换热系数; T_s 为表面温度; T_a 为环境温度。

联立式(1)~式(4)以及边界条件式(5),即可求出锅具表面任一时刻的温度分布,由于实际计算过程中求解的复杂性,本文采用有限元仿真软件 Maxwell(涡流场)和 Ansys Workbench 中的 Transient Thermal(瞬态温度场)模块进行双向耦合仿真。利用 Maxwell 进行涡流场分析,计算出加热线圈在锅具中产生的涡流损耗,将涡流损耗导入到 Transient Thermal 作为热源,进行瞬态温度场分析,考虑到材料的热导率、磁导率、电导率和比热容的温度依赖性对温度的分布具有较大的影响^[8,9],因此将温度场每隔一段时间计算得到的温度反馈回 Maxwell 中重新进行涡流场分析,如此循环迭代,直到瞬态场热收敛为止。综合考虑计算精度和计算量,仿真过程中,以 5s 为一个周期进行耦合反馈。

3 两种线圈结构比较

在保证锅具的涡流损耗和线圈加热半径相同的情况下,比较新型多相位多线圈电磁炉结构与传统单线圈电磁炉结构的锅具表面的涡流和温度分布。

430# 不锈钢因其耐腐蚀性好、导热性好、热膨胀系数小和耐热疲劳等优点而被广泛用于感应加热。因此本文选取 430# 不锈钢作为锅具材料,考虑到在加热过程中,材料物理参数的温度依赖性对温度分布有着较大的影响,仿真过程中利用有限元仿真软件 Maxwell 与 Ansys Workbench 进行涡流场与温度场的双向耦合以提高结果的准确性。430# 不锈钢随温度变化的材料参数见表 1。

表 1 430# 不锈钢材料参数

Tab. 1 Parameters of 430#

温度/ ℃	相对 磁导率	电阻率/ $\times 10^6 (\Omega \cdot m)$	导热系数/ (W/mK)	比热容/ (J/(kg·K))
20	200	0.184	47.5	475
100	198	0.272	42.5	480
200	182	0.384	40.0	500
300	175	0.512	37.13	525
400	161	0.550	36.02	560
500	155	0.656	33.15	620
600	135	0.824	32.00	700
700	104	0.950	28.50	855
720	84	0.980	27.49	916
742	35	1.020	26.20	986
760	1	1.040	25.15	1065
800	1	1.032	26.49	806
900	1	1.152	25.82	637
1000	1	1.200	24.02	602

3.1 两种线圈的模型

传统单线圈电磁炉的结构如图 1 所示,实际线圈是螺旋形,但由于绕组匝间距离较小,仿真时本文采用圆盘线圈替代螺旋线圈且励磁电流沿圆盘半径均匀分布,以降低计算量。本文提出的新型多相位多线圈电磁炉,采用多个小螺旋线圈,且分开一定距离,线圈的排布方式如图 2 所示,箭头表示加载电流的正方向,角度表示加载电流的相位。外围六个线圈的电流相位两两互差 180°,与文献[10]中不同的是,中间线圈电流与外围六个线圈电流均相差 90°,这样的电流加载方式相对比较方便。两种线圈的仿真模型参数见表 2。仿真中锅具与线圈距离为 7mm。

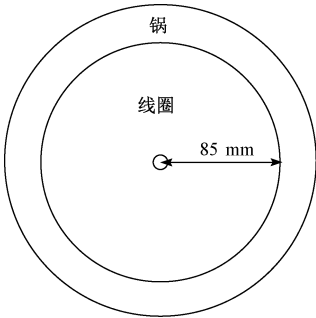


图 1 传统单线圈电磁炉形状

Fig. 1 Shape of traditional single coil induction cooker

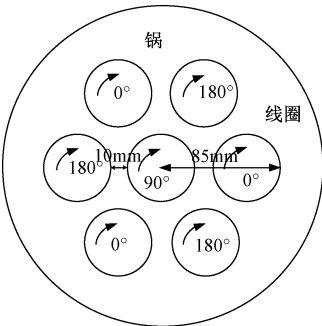


图 2 新型多相位多线圈电磁炉形状

Fig. 2 Shape of novel multiphase multicoil induction cooker

表 2 传统电磁炉和新型电磁炉的仿真模型参数

Tab. 2 Parameters of traditional and novel induction cooker

	半径/mm		厚度/ mm	线圈 间距/mm
	内径	外径		
锅具	—	100	2	—
单线圈	5	85	2	—
多线圈	5	25	2	10

3.2 涡流场与温度场分析

在频率 20kHz、锅具的涡流损耗为 1.2kW、线圈总加热半径为 85mm 的情况下,仿真加热 30s 得到传统单线圈电磁炉与新型多相位多线圈电磁炉锅具表面的涡流分布和温度分布,分别如图 3 ~ 图 6 所示。从图 3 和图 4 中可以看到,单线圈结构由于产生磁场的非均匀性,使得锅具圆心位置和边缘位置涡流分布较低;而多相位多线圈电磁炉,相邻线圈间由于各个励磁电流的相互影响,使得磁场更加均匀。同时,中心位置的线圈提高了锅具中心位置的磁场和涡流,并利用锅具的导热性将中心位置的发热量传向外圈。由图 5 和图 6 可知,单个线圈电磁炉,锅具的圆心位置和边缘温度较低,高温区主要集中在锅具中间的圆环位置;而多相位多线圈电磁炉,在保

证相同锅具受热面积的同时提高了锅具表面温度分布的均匀性。

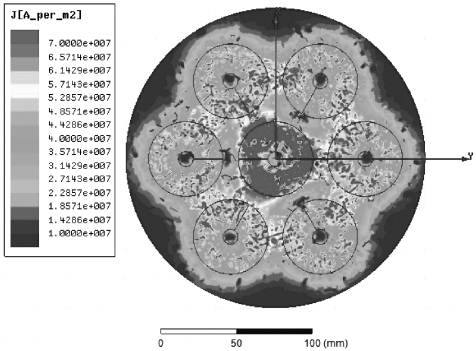


图 3 多相位多线圈电磁炉锅具表面涡流分布图

Fig. 3 Eddy current distribution of multiphase multicoil induction cooker

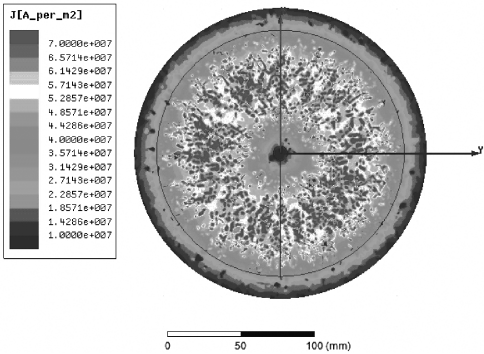


图 4 单线圈电磁炉锅具表面涡流分布图

Fig. 4 Eddy current distribution of single-coil induction cooker

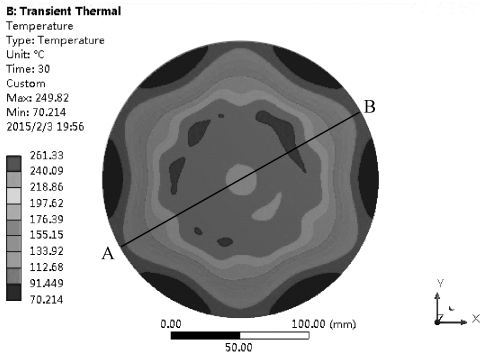


图 5 新型多相位多线圈电磁炉加热 30s 锅具表面温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution of multiphase multicoil induction cooker at 30s

为了更直观且定量地分析,绘出沿着锅具直径 AB 线上的温度分布曲线图,如图 7 所示,引入温度的平均值 \bar{T} 、标准方差 S_N 和相对标准方差 S_{ref} 来衡量温度的均衡性^[11],其数学表达式为:

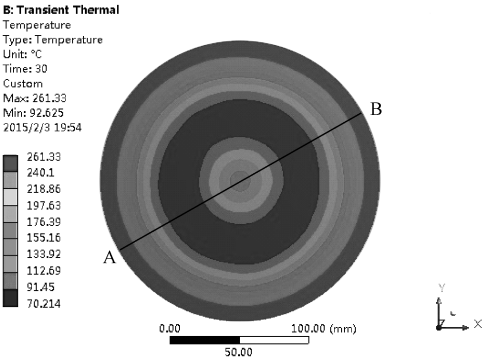


图 6 传统单线圈电磁炉加热 30s 锅具表面温度分布图

Fig.6 Temperature distribution of single-coil induction cooker at 30s

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} \tag{6}$$

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \tag{7}$$

$$S_{\text{ref}} = \frac{S_N}{\bar{T}} \tag{8}$$

式中, T_i 为沿着锅具中线上第 i 个采样点的温度, 用来衡量温度偏离平均值的程度。由于不同线圈结构的电磁炉平均温度不同, 为了更好地衡量温度的偏离程度(也就是温度的均衡性), 我们引入温度的相对标准方差, 相对标准方差越小表示温度分布越均匀。通过计算得到两种线圈结构锅具温度的平均值、标准方差和相对标准方差, 见表 3。

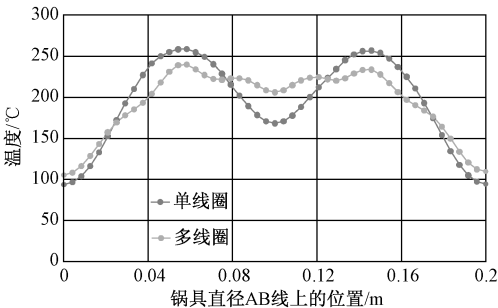


图 7 锅具直径 AB 线上的温度分布曲线图

Fig.7 Temperature distribution on midline AB at 30s

表 3 两种不同线圈结构电磁炉锅具中线温度分析

Tab.3 Temperature analysis of two different systems

结构	温度		
	平均值 /°C	标准 方差/°C	相对标准 方差(%)
单线圈	194	53.3	27.4
多线圈	193	41.3	21.4

从图 7 和表 2 可知,传统单线圈电磁炉锅具表面温度最大值为 260℃,中间温度最小值为 170℃,两者相差 90℃,其平均值为 194℃,相对偏差为 27.4%。新型多相位多线圈电磁炉锅具表面温度最大值为 240℃,中间温度最小值为 200℃,二者仅 40℃之差,其平均值为 193℃,相对偏差为 21.4%,以上的数据更直观地说明了新型多线圈电磁炉在提高锅具表面温度分布均衡性具有较强的优势,尤其是锅具中心区域,温度均匀性更好。

4 结论

为解决传统单线圈电磁炉由于温度分布不均匀易导致食物烧焦、锅具变形等问题,本文提出和设计了一种新型的具有不同相位励磁的多线圈电磁炉,以提高锅具温度分布的均衡性;利用有限元仿真软件 Maxwell 和 Ansys Workbench 采用涡流场和热传导场的双向迭代实现了两种物理场的耦合仿真;在保证锅具的涡流损耗和线圈有效加热半径相同的情况下,对比分析了传统线圈电磁炉和新型多线圈电磁炉锅具表面的涡流和温度分布,结果表明新型多相位多线圈电磁炉的温度均衡性显著提高。本文提出的多线圈方案和仿真分析方法对多线圈电磁炉的设计提供了理论指导,具有一定的实际应用价值。

参考文献 (References):

[1] 韩永霞,张敏 (Han Yongxia, Zhang Min). 电磁炉的加热性能仿真研究 (Simulation of the heating performance of the induction cooker) [J]. 机电一体化 (Mechatronics), 2010, 16 (9): 44-47.

[2] S Llorente, F Monterde, J M Burdío, et al. A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers [A]. 17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. 2002. 1168-1174.

[3] J Acero, R Alonso, J M Burdío, et al. Enhancement of induction heating performance by sandwiched planar windings [J]. Electronics Letters, 2006, 42 (4): 241-242.

[4] H W E Koertzen, J D van Wyk, J A Ferreira. An investigation of the analytical computation of inductance and AC resistance of the heat-coil for induction cookers [A]. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting [C]. 1992. 1113-1119.

[5] L C Meng, K W E Cheng, K W Chan. Heating performance improvement and field study of the induction cooker [A]. 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications [C]. 2009. 1-5.